

## 4.7 計測・制御技術

### 4.7.1 展望

計測・制御技術は日本鉄鋼業が直面してきた諸問題、すなわち①環境対策②省エネルギー③合理化（高級鋼化も含む）の課題に対してこの10年間これらニーズに応じて発展してきた。その原動力となつたのは、マイクロエレクトロニクスの進歩に基づく各種シズ技術の進歩充実であつた。以下これら成果変遷を展望する。

#### (1) 環境対策

有害ガス/水質分析計、粉塵濃度計、騒音計などそれまでの実験室用計器のオンライン実用化、校正法確立に苦心し、あるいは音源等の解析システムや大気拡散予測モデルの構築とその活用による環境管理システムの実現などの成果を上げた。

#### (2) 省エネルギー

燃焼制御においてはコークス炉の自動燃焼制御 (ACC)、焼結の燃焼制御やヒートパターンの改善、鋼片加熱炉や熱風炉における直挿式微量 O<sub>2</sub> 計利用の排ガス O<sub>2</sub> 制御などが実現した。

排熱排エネルギー回収分野では高炉炉頂圧回収タービン (TRT) を初めとする諸回収装置の計測制御システムが出現した。工程省略分野では連続造化、連続焼鈍化、HCR/HDR 化などにおいて各種のセンサーの開発一特に省エネルギーと同時に品質保証を行うための熱間スラブ疵検出器の開発一が活発に行われ、コンピュータ活用と併せてオンライン品質保証/工程管理の有力な支援システムを実現する方向に向かつている。

#### (3) 合理化

上記(1)、(2)を含めた鉄鋼業合理化の要点と計測制御上の成果を試みに対比したものが表4.7.1である。厳密な1対1対応ではないが、両者の密接な関係が見受けられる。

製鉄：計測制御面では「安定化」（究極的には自動制御化）のためのプロセス解明用センサー開発が続いているほか、長寿命化のための温度解析、炉壁プロフィール計、耐火物診断などが新しい傾向として現れた。

製鋼：主流は連鑄の計測制御に移行した。基本となる温度・凝固厚計測制御、ロール配列位置や製品寸法疵等の品質計測の開発が活発に行われた。

熱延・厚板：プロセスが成熟し、主体技術テーマの大半が制御テーマとなつた。品質歩留りの限界に挑戦する計測制御テーマが次々に実用化された。

冷延：冷延 AGC が進歩し、最近急増中の表面処理ラインに関する各種センサーの開発が中心であつた。

条鋼：品質保証に係わる計測技術中心に展開し、他方張力制御や寸法制御の進歩も見られた。

鋼管：油井管生産設備急増期に当たつたが、品質保証が NDI から完全ネジ長さ等にも及んだ。また ERW の制御も盛んに開発された。

その他：自動化が一段落、設備診断技術が徐々に増加中。これは設備長寿命化やプロセス直結化に伴うプラント信頼性向上のニーズに対応した動きである。LA や CAD、シミュレーション等支援技術の進歩も新しい重要な技術の流れである。

#### (4) シズ技術の進歩

以上の10年の進歩はエレクトロニクス技術の進歩に負う所が大きい。すなわち超 LSI 等の回路素子、CCD 等の電子光、電磁気センサー、レーザやプラズマ等の高密度エネルギー計装や ASR 等のデジタル化拡大、光ファイバーケーブル等の通信手段一等々の進歩発展である。一方使用者の鉄鋼業内部でもシステム技術、制御技術、ソフトウェア技術が年々向上し、多変数制御や画像処理技術が発展しつつある。

#### (5) 今後の展望

製品の高級化、製造の合理化のため設備の高度化は必須であり、計測制御はその中核の一つである。センサーベースの一貫品質保証/作り込みへ向けセンサーは高度化し、通信手段の発達に伴つて制御/情報システムはトータル化をますます深めよう。ここで問題は全システムの性能費用比、信頼性、保全性であつて今後ますます困難で重要な技術課題となる。目下のソフトウェア危機と併せ関心を深め解決に努力せねばならない。診断技術はその一つの新しい対策として注目すべきと思われる。

## 4.7.2 製鉄・原料

### (1) 概況

製鉄・原料部門の計測制御技術のこの10年の進歩を概観すると高炉部門に大きな特徴がみられる。高炉解体調査からの知見と操業の多様化により、既存の技術に光、電磁気応用の新技術を導入した高炉専用センサーが開発され、これらセンサー情報と数式モデルを組み合わせるプロセス計算機を利用した高炉操業管理システムが考案され実操業に適用された。

焼結部門は焼成と品質の把握を目的とした計測センサーと数式モデルのほかはきわだつて大きな特徴はみられない。原料、コークス部門は省力、省エネルギーのための自動化、プロセス計算機によるシステム化の開発が進められた。

プロセス計算機の導入は、高炉メーカーの設置総台数がこの10年直線的な伸びを示しているのに比較し低操

表 4.7.1 10 年間の鉄鋼業合理化と計測制御技術の歩み  
(日本鉄鋼協会共同研究会計測部会資料 (昭和 49-59 年) より)

工 程	主要合理化内容 (期間) <主要事項>	計測・制御上の成果
1	製鉄原料 ① コークス炉省エネルギー (昭52~) <CDQ, コークス炉燃焼制御> ② 焼結省エネルギー (昭43~) <クーラー排熱回収, ヒートパタン改良, 点火炉燃焼改良>	A 原料管理計算機システム (昭50) B コークス炉 ACC (昭51) C 焼結点火炉燃焼制御 (昭54) D 層内ヒートパターン測定 (昭55) E 焼結配合原料赤外線水分計 (昭56) F コークス炉壁測温 (昭57) G 焼結鉄成品成分一定化制御システム (昭57) H コークス, 焼結, 石炭組織分析 (昭56-昭59)
2	製鉄 ① 製鉄省エネルギー (昭49~) <脱湿送風, TRT, 熱風炉排熱回収> ② 高炉大型化, 安定化 (昭49~54) <炉体冷却法, 耐火物材質, 炉頂装入改良操業法改良> ③ 高炉長寿命化 (昭52~) <炉体冷却法, 炉底構造, 熱間補修> ④ オイルレス化 (昭54~56) <PCI, COM, CTM>	A 熱風炉計算機制御 (昭49) B 炉頂赤外線 T. V. (昭50) C 改修時炉壁プロフィール測定 (昭50) D 高炉シャフトゾンデ (昭50) E 高炉羽口先測定 (昭51) F 熱風炉排ガス O <sub>2</sub> 制御 (昭52) G マグネットメータによる炉内観測 (昭52) H 高炉 T. V. 計装化 (昭53) I TRT計装 (昭53) J 装入物プロフィール計 (昭54) K 高炉溶融帯センサー (昭55) L PC流量計 (昭56) M 炉底温度解析 (昭57) N 炉況診断システム (昭58) O 高炉レースウェイゾンデ (昭59) P 融着帯ファイバースコープ観測 (昭59)
3	転炉 ① LDG回収強化 (昭49~) <不活性気層究明, 炉口ノロ除去装置> ② 電気炉省エネルギー (昭49~) <UHP化, スクラップ予熱> ③ 転炉化, 複合吹錬化 (昭54~) <各種複合吹錬技術, 底吹ノズル> ④ 事前・事後処理 (昭52~) <溶鉄 S, P, Si の予備処理, 二次 (真空/非真空) 精錬, 高純度鋼化>	A 溶鉄自動測温/サンプリング (昭49) B 電気炉デマンド制御 (昭50) C 転炉サブランスシステム (昭52) D Q-BOP計測制御システム (昭53) E 転炉内壁プロフィール計 (昭54) F 質量分析計利用排ガス制御 (昭54) G サウンドメータによるスロッピング制御 (昭56) H スラッグフォーミング計 (昭56) I 転炉排ガス回収制御 (昭58)
4	連  鑄 ① 低ヘッド化 (昭54~) <わん曲型連鑄, 水平連鑄> ② 適用鋼種拡大 (昭54~) <リムド相当鋼, 回転連鑄> ③ 連々鑄化 (昭54~) <スウィベルタワー, 幅可変モールド> ④ 自動化 (昭54~) <ダミーバ装着, ローラスタンドクイックチェンジ> ⑤ 直行化 (昭49~) <HCR, HDR>	A 連鑄オートボア制御 (昭50) B 溶着式温度計 (鑄片測温) (昭51) C ロールアライメント計 (昭53-昭55) D 連鑄2次冷却制御 (昭52-昭55) E モールド内溶鋼レベル計 (昭54-昭59) F 鑄片凝固厚さ計 (昭54) G 鑄込みノズル内スラッグ検知 (昭56) H パウダ自動供給 (昭56) I 熱間スラップ疵検出 (昭56) J スラップ幅計 (昭51-昭57) K 鑄型幅・テーパ制御 (昭57) L パウダフィルム厚さ計 (昭58) M 光ファイバ温度分布計 (昭58)
5	熱  延 ① 省エネルギー-圧延 (昭49~) <幅大圧下, 仕上強圧下, 抽出温度制御> ② 圧延, 歩留り向上, 品質向上 (昭49~) <AGC改良, クラウン制御, エッジドロップ減少, 幅制御, 仕上温度一定化>	A デジタル高精度幅計 (昭49) B フィードフォワード AGC (昭50) C 熱延クラウン計 (昭50) D GMDHによる荷重モデル同定 (昭52) E 油圧圧下デジタル AGC (昭54) F 熱延形状制御システム (昭55) G オンライン表面疵計 (昭55) H 熱延巻形状計 (昭52-昭57) I 自動幅制御 (AWC) (昭57) J 粗クロップ形状計 (昭56-昭59)

6	冷延 表面処理	① 冷延完全連続化(昭49~)<NHミル等新型ミル> ② 連続焼鈍化(昭53~)<プロセスメタラジー> ③ 表面処理増強(昭56~)<片面めっき, 多層めっき>	A 表面疵検査装置 (昭49) B 全スタンダG C (昭49) C 冷延形状計 (昭51) D 表面皮膜計 (昭53) E 連続焼鈍炉計算機制御 (昭53) F 電気亜鉛めっき厚計 (昭53) G 冷延ロール偏心制御 (昭57) H 非定常時冷延AGC (昭57) I 酸洗酸濃度計 (昭58) J 冷延多変数制御 (昭58) K 鋼板温度制御 (昭59) L 鋼板表面粗さ計 (昭59)
7	厚板	① 歩留り向上(昭49~)<幅制御, 平面形状制御, オンラインUST> ② 材質対応(昭50~)<制御圧延, 調質冷却>	A 厚板幅長さ計 (昭50) B デジタル線厚み計 (昭50) C 厚板全自動圧延 (昭51) D 厚板オンラインUST (昭53) E 平面形状制御システム (昭54) F 平坦形状測定 (昭55) G 調質冷却制御システム (昭57) H ドグボーン圧延制御 (昭58)
8	条鋼	① 高品質化(昭50~)<NTミル, オンラインNDI, 張力一定化> ② 調質冷却(昭56~)<プロセスメタラジー, 冷却制御>	A 線材偏差計 (昭49) B 形鋼最適鋸断システム (昭51) C 棒鋼自動磁気探傷 (昭51) D 形鋼張力制御 (昭52) E 丸棒自動超音波探傷 (昭54) F 加熱炉排ガスO <sub>2</sub> 制御 (昭55) G 棒鋼プロフィール計 (昭55) H 角ビレット表面疵UST (昭56) I 線材熱間渦流探傷 (昭57) J ビレットミル断面寸法制御 (昭58)
9	鋼管	① 設備新設(昭52~)<シームレス鋼管工場新設> ② 高品質化(昭52~)<鋼管各種NDI, 耐食性鋼ねじ加工精度 寸法一定化>	A 中径シームレス磁気探傷 (昭51) B 鋼管自動測寸 (昭52) C 油井管内面磁気探傷 (昭52) D 鋼管外径計 (昭52) E 回転式UST (昭52-昭56) F 溶接位置検出 (昭53) G ERW自動溶接制御 (昭56) H 光切断式ビート形状計 (昭56) I 中径シームレス熱間肉厚計 (昭57) J パイプ完全ねじ長さ自動測定 (昭57) K ERW入熱制御システム (昭56-昭57) L ポリエチレン被覆厚さ計 (昭57)
10	環境	① 大気汚染防止(昭49~54)<LPGLNG貯蔵・気化技術, パーナ改良, 建家集塵, 排煙脱硫> ② 水質汚染防止(昭49~54)<排水クローズド化> ③ その他(昭49~)<廃棄物利用, 騒音防止, 環境モニタ>	A 排煙監視テレメータ (昭49) B 水質計評価 (昭50) C NO <sub>x</sub> 計評価 (昭50) D 水中油分計 (昭51) E 煤塵測定器評価 (昭51) F LPG設備計装 (昭52) G 環境管理計装 (昭52) H 排水流量計 (昭53)
11	その他	① 設備診断技術(昭54~)<回転機, 耐火物, 制御装置> ② 自動化(昭49~)<ロボット応用, 付帯作業自動化> ③ 新計測法/境界技術(-)<LA, 品質計測, CAD>	A 三種混合ガスカロリー制御 (昭51) B 材料試験自動化 (昭52) C ラボラトリーオートメーション (昭53) D 厚板自動打刻, 吹き付け機 (昭53) E 伝達開教直視装置の開発 (昭54) F クレーン自動化 (昭54) G 切板梱包自動化 (昭54) H 耐火物侵食診断 (昭55) I 残留オーステナイトオンライン計測 (昭56) J 磁気浮上センサー (昭57) K 水柱超音波距離計 (昭57) L 連铸設備診断システム (昭58) M 放射温度計トレーサビリティ (昭58) N 電気計装用CAD (昭59)

項 目		昭和 49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
原 料	自動化・システム化										
	造粒・点火炉センサー	↑5件									
焼 結	焼成・成品センサー										
	制御モデル・システム										
コークス	燃焼制御システム										
	自 動 化										
高 炉 (センサー)	炉口ガス流・装入物分布										
	塊状帯・熔融帯										
	羽口・レースウェイ										
	耐火物侵食										
高 炉 (モデル・システム)	熔融帯・ガス流れ推定										
	炉熱レベル推定										
	操業管理システム										

図 4.7.1 鉄鋼協会講演大会発表論文における計測と制御の推移

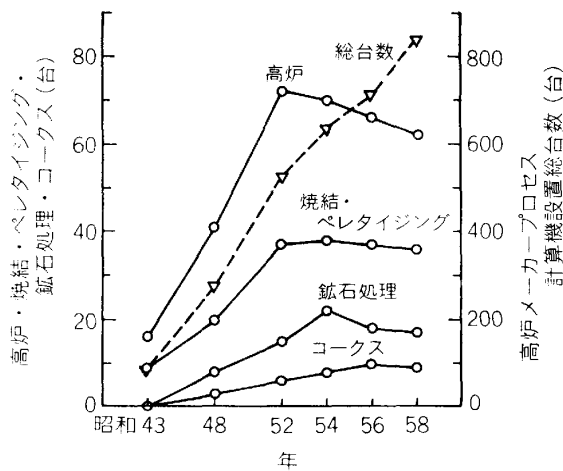


図 4.7.2 プロセス計算機設置状況 (鉄連調査結果)

業の影響で昭和 52 年頃からは製鉄・原料の全部門ではほぼ横ばいの状態である。昭和 58 年でのプロセス計算機設置総合数に占める製鉄・原料部門は約 15% である。

(2) 原料・焼結の計測・制御

原料部門は従来自動化、システム化が比較のおくれている部門であった。

昭和 40 年代中頃より原料受入作業の省力化が強く要請され、ヤード移動機の自動化が進められた。当初は信号伝送、障害物検知、遠隔監視方式の選定などに技術的問題はあつたが徐々に解決されアンローダ、スタッカ、リクレーマの無人化が実用になつてきた。プロセス計算機の導入で配合計画システム、コンベア系統選択運転システム、在庫管理システムを柱とする原料管理システムの開発が行われ省力化、作業合理化に寄与している。

原料品質管理では鉬石ベッド品質モニタリングシステムが考案された。これはベッドの長手方向の各位置に積みつけられた原料の重量と、既知の個別成分を用いてベッド内化学成分分布を知るシステムで、品質の異常に早く対応でき、サンプラーと分析設備を必要としないことを特徴としている。原料のトラッキング精度がモニタリング精度の大きな要因となつている。

焼結部門は焼結鉬の品質に大きな影響を及ぼす焼成過程に主眼を置いた計測技術と制御モデルの開発が進められた点に特徴がある。一方環境汚染に対する厳しい規制がなされ粉塵、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> などの抑制技術の研究が続けられるとともに排出量の監視が義務づけられた。昭和 47 年に計量法の一部改正が行われ環境計測器が計量法上の規制を受け性能向上と信頼性の確保が図られた。SO<sub>x</sub> 排出量は、濃度は紫外線吸収式または非分散赤外線吸収式で、排ガス量はピトー管方式で測定され、計測した量は計算機で集計しテレメータで関係官庁へ伝送されている。

焼結の造粒工程では粒度分布連続測定装置がある。これは ITV カメラと画像処理技術を応用したもので落下中のコークスをストロボで撮影し粒径を求めるもので測定時間は 40 min であるが、従来の篩分けによる方法に比較し連続性、測定値の代表性の向上がある。原料水分計は中性子水分計が主流であるが二波長比較型の赤外線式や石灰石の水分測定としてマイクロ波式水分計が一部で導入されている。

焼成工程では燃焼熔融帯の特性を把握する手段としてヒートパターン測定または推定する方法が種々提案された。直接測定する方法では、特殊グレードバー上に高さ方向 3 点に固定した熱電対で焼結層内温度を得て無線送信する方法がある。一方センターケーキの排鉬部断面を ITV カメラで撮像し赤熱層厚を計測し、風箱温度や点火炉での原料表面温度から指数関数近似でヒートパターンを求める方法も考案されている。数式モデルにより推定する方法では、理論モデルのほかに焼結機長手方向の風量分布が焼成過程の進行で生じる焼結ベッドの通気抵抗の違いによつて変化することを利用して間接的に計測する方法が開発されている。風量分布は漏風の影響を避けるため、ベッド上に置いた風箱で吸引風量を測定することで得られる。センサーは熱線式、超音波式、タービンメータ式など種々あり、センサーが収納されている

風箱内に安定した流速分布を得るための機構と焼結機の移動に伴って測定と復帰を行う自動測定機構からなっている。

成品焼結鉄の性状を迅速に把握するための計測技術も進歩した。成品の強度・粒度は自動サンプリング装置と測定の自動化が進められ、焼結鉄中の  $Fe_3O_4$  の磁気的性質を利用して連続的に計測できる  $FeO$  メータが一部で実用化した。

焼結自動制御は成品成分 ( $CaO, SiO_2, MgO, FeO$ ) が一定となるよう予測計算を行い線型計画法を用いて原料の最適切出制御を行う焼結鉄成分制御が提案された。このように操業中の品質を予測し、センサー情報を焼結プロセス制御に適用し自動制御の確立を図るための焼結操業予測システムの開発も進められ一部は実用化している。

今後は品質予測、省エネルギー、省資源を目的とした焼結操業計画から設備管理までの焼結総合管理システムの確立がされていくであろう。

(3) コークスの計測・制御

従来他の製鉄部門より比較のおくれていたコークス部門の計測の自動化では炉温管理のための炉壁測定と石炭組織分析がある。組織分析の自動化は石炭組織間の反射率の差に着目しカメラで撮像し画像解析して求める方法で今後この種の石炭およびコークス組織分析の自動化が広く工程管理に利用されていくと考えられる。炉廻り移動機械の自動化は種々試みられているが定位置停止、単位機械動作の信頼性および故障時の対処方法などの解決すべき問題があり今後の課題の一つとなっている。

計算機制御では石炭配合と燃焼制御があり、前者は配合計算の自動化とともに配合精度向上を目的としたデジタル計装による一定装入重量制御 (Constant Feed Weight Control) の導入がある。

コークス炉燃焼制御は操業要因変化および各窯特性による乾留時間ばらつきを減少し、乾留熱量低減、コークス品質の向上安定を図ることを目的に開発され実用化した。これは炉団ごとの温度制御と窯ごとの温度調節から成り立っている。炉温はフリーのヘアピントップに設置された熱電対で測定し、火落判定は上昇管ガス温度による。燃焼制御の効果として窯ごとの火落時間のばらつきの減少、乾留熱量 20 kcal/kg-coal の低減、コークス強度  $DI_{90}$  が 0.1~0.3 向上したという報告もある。

(4) 高炉の計測・制御

高炉の計測制御技術はエレクトロニクスの進歩と光、マイクロ波、電磁気応用の新技術の導入により著しい進歩を示した。高炉設備の大型化と低位安定操業志向という面から計測と制御に対するニーズも多様化し、センサーの装備点数は新設高炉で増加の一途をたどり昭和40年代初頭に比し約6倍に増大した。

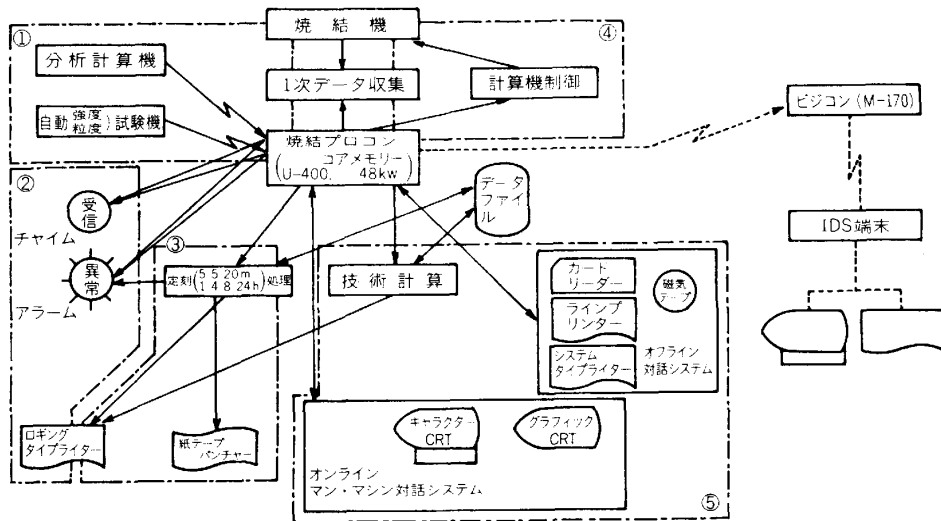
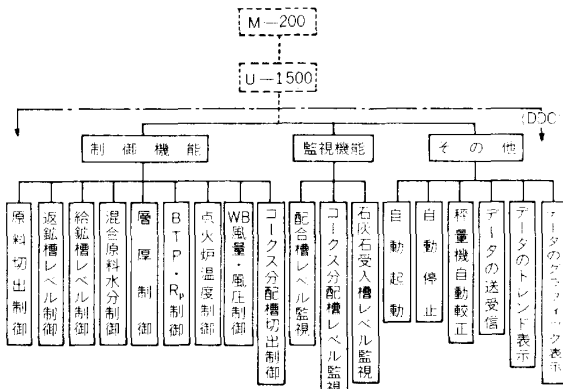


図 4.7.3 焼結プロセスの計測制御システム

(上図：日本鉄鋼協会共同研究会：第 62 回製鉄部会 (1983 年 5 月) 川崎製鉄(株) (私信)  
 下図：同上：第 61 回製鉄部会 (1982 年 10 月) 新日本製鉄(株) (私信)

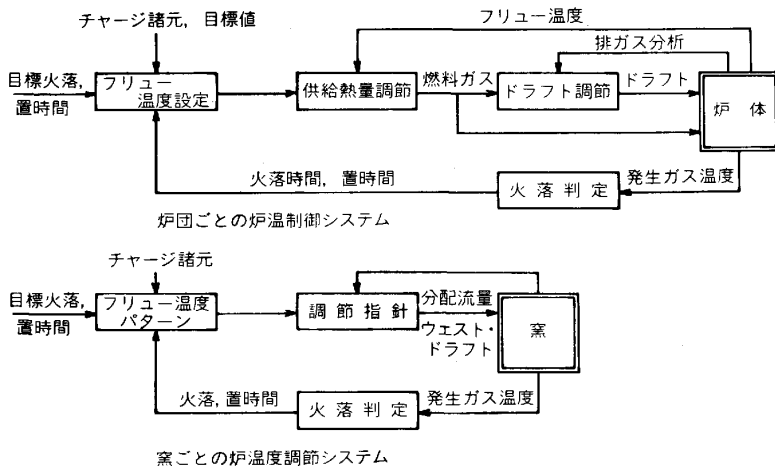


図 4.7.4 コークス炉燃焼制御システム

表 4.7.2 高炉計測技術の進展

昭和	塊状帯の計測		溶融帯の計測		炉下部の計測	炉体管理計測 (耐火物侵食)	その他
	装入物分布・荷下り	ガス流分布	直接法				
49		熱線式相関流速計					
50		炉頂サーモグラフィ					
51				RI挿入法		TDR法(ED法)	
52	移動式サウンディング				羽口観察テレビ	炉底熱流計法	
53	炉口暗視カメラ	炉口サーモカメラ ビト管熱線式流速計					
54	多点同時サウンディング					炉底側板熱流計法	
55	マグネット・メータ レーザー(光切断方式) マイクロ波方式	フルイド式流速計 タービン式流速計		挿入式垂直ゾンデ法	羽口高速度カメラ	熱電対応答法	スラグ流量計 質量分析計
56	レーザー(三角測量方式)			TDRケーブルフィード法	羽口先輝度計		微粉炭流量計
57						熱電対応答法 (付着物)	
58							イメージファイバ塔 載ゾンデ

昭和 50 年代の特徴は汎用センサーの信頼性、性能向上とともに、炉ロガスの制御に代表される操業技術の進歩、省エネルギー、製鉄コストに影響の大きい高炉の長寿命化などを背景とした新しい高炉専用センサーの開発が挙げられる。

(a) 汎用センサーの性能向上

汎用センサーではガスクロ分析計がある。多成分の同時分析が可能のため高炉ガスの分析用として定着した。一方精度向上のための改善も進められ、高炉プロセス制御のためのモデル要求精度の観点から高精度ガスクロの開発も行われ分析再現性で  $\pm 0.1\%$  F.S が得られている。更にガスクロより多成分を同時に高精度で連続的に分析可能な質量分析計の導入も試みられている。

温度計ではシーズ熱電対の性能、耐久性の向上と普及

がゾンデ類による炉内温度分布や各種炉体管理計測の向上に寄与した。装入原料のオンライン分析に用いられる中性子水分計では従来の散乱型の  $Am^{241}$  のかわりに  $Cf^{252}$  を使用し  $\gamma$  線による密度補正と組み合わせで  $\pm 2.0\text{ wt}\%$  から  $\pm 0.5\text{ wt}\%$  (at  $5\text{ wt}\%$ ) に精度向上を遂げている。トーピードカーレベル計測は精度向上と小型化によるロードセル方式が普及する一方マイクロ波レベル計が開発され作業員の負荷軽減、システム化に寄与している。

(b) 新しい高炉専用センサーの開発

新しい高炉専用センサーの第一の特徴は炉体表面の計測から炉体内部の計測を目的としたセンサーの開発である。昭和 40 年代中頃から実施された高炉解体調査から得られた知見および高炉の大型化と社会、経済の多様化に伴う操業の弾力性、安定性が要求されたことによる。

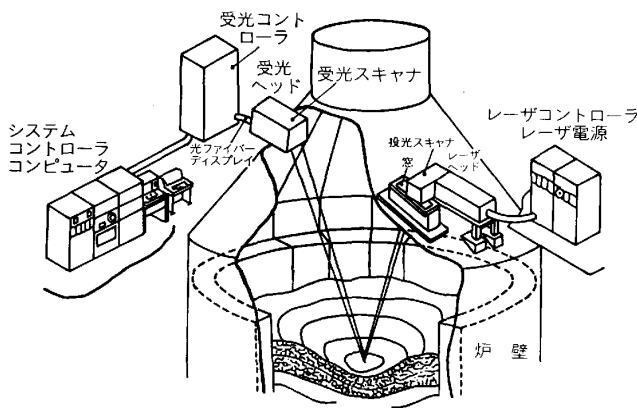


図 4.7.5 レーザ方式高炉炉頂プロフィールメータ  
(日本鉄鋼協会共同研究会：第 80 回計測部会 (1982 年 3 月) 新日本製鉄(株) (私信))

炉内計測技術の進歩は塊状帯での装入物分布とガス流分布および溶融帯の位置、形状を把握することを目的としたセンサーの開発に代表される。

装入物分布の計測はサウンディング方式により直接測定する接触式とマイクロ波やレーザーを用いた光切断法、三角測量法による非接触式がある。マイクロ波レーダは当初サウンディング計として実用化され、分布計としては原料表面の凹凸による反射波同志の干渉現象の除去や指向性の改良、データ処理の強化で実用化がされた。ほぼ同時期に開発されたレーザー方式は三角測量の原理で光ファイバー利用の受光装置を用い、ジャイアントパルス Y-Al-ガーネット (YAG) レーザ光の角度と装入物面のレーザスポットの光学的角度情報から計算機でプロフィールに演算し表示するものでオンライン精度は $\pm 30$  mm である。しかしこれらはいずれも表面形状の測定で、原料装入による形状変化に対しては無力であり混合層の測定はできない欠点がある。

大型化した高炉の特徴として円周および半径方向の不均一性の増大がある。その一例に装入物の降下状況があり直接計測する手段として鉱石、コークス両層の透磁率の差を検知、識別し降下速度、層厚、層厚比などの装入物分布の挙動を計測するマグネットメータが開発され注目された。

ガス流分布の計測は直接測定する方法とガス流の指標となる量の分布を測定する間接法がある。直接的には羽口レベルから He ガスを打込炉口部で検知し、羽口レベルから炉口部までの He の滞留時間を測定することでガス流速を知る He トレーサ法が初期の頃用いられた。一方動圧分布測定、ピトー管熱線式、タービン式などの流速計が採用されているが炉口部でのガス流速が最大 4~5 m/s 程度と低流速域の測定であることと悪環境のため保安全性やデータの再現性などでまだ十分なものではない。間接的な方法では赤外線ビジョン、サーモカメラで

装入物表面の温度パターンから推定する方法やシャフト部ゾンデなどによるガス温度、組成、圧力から数式モデルで推定する方法がある。

溶融帯を稼動中の高炉で実測することは非常に困難であり各種ゾンデの計測値から数式モデルで推定しているのが一般的である。直接計測する方法としては RI トレーサ法や送り込み式垂直プローブ法および電線の断線検知に用いられている TDR 法 (Time Domain Reflectometry) に着目しマイコンを用いて自動化した TDR ケーブルフィード法などがあるが形状および連続測定については今一步の感がある。

光計測技術を利用して塊状帯、溶融帯を直接観察するゾンデが開発されコークスの挙動や焼結鉱の還元粉化の実態を稼動中の高炉で把握できた。これは 30000 の画素数をもつ石英タイプファイバースコープを搭載した垂直ゾンデで炉内試料の採取、ガス温度、組成、圧力の測定も可能な多目的ゾンデである。今後操業と他のセンサー測定値との対応が調査されれば操業技術の向上に有効なものとなる。

炉下部は羽口先観察テレビ、輝度計や高速カメラを利用してレースウェイの状況を観察するに留まっている。

第二の特徴は脱オイル化で微粉炭吹き込みが注目されその計測技術が開発されたことである。微粉炭は固気二相流量の計測であり差圧方式や静電容量により粉体の密度を、ゆらぎを利用して相関方式で流速を測定し、それらの積として質量流量を  $\pm 5\%$  F.S の精度で測定できる流量計が実用化している。

熱風炉制御はその大部分が省エネルギーを指向したものであり、排ガス  $O_2$  分析計の信頼性向上で空燃比制御への適用が一般化し熱効率の向上に寄与している。

#### (c) 高炉長寿命化のセンサーの開発

高炉長寿命化のニーズに対応した炉体管理計測の進歩も急速に行われた。炉体冷却器の保護と破損の早期検知は昭和 50 年代中頃まで各種方式が考案され定着した。耐火物侵食量の測定は部位により条件が異なり、種々の計測技術が採用されてきた。連続的な測定法は電位パルスの TDR の原理を利用した電位パルス法、耐火物厚さ方向の複数位置の温度変動とその伝播遅れから残存厚さを解析する熱電対応答法がある。しかし点測定であることは避け得ずまた付着物の生成への対処が課題である。最近熱電対応答法を利用し付着物の厚さを測定できるセンサーも報告されている。鉄皮表面からの熱流束を測定し侵食量を推定する熱流計法も各種試みられている。

#### (d) 高炉システムとプロセスモデル

固液気相の反応を伴う高炉プロセスでは多量の情報が主としてセンサー単位で与えられ、複数情報の履歴、分

布、相関などでアクション量や方法が決定される。

高炉プロセスを制御する目的でこれらセンサー情報と各種数式モデルとを組み合わせて、計算機を利用し炉内状況を総合的に判断する高炉操業管理システムの開発が進められている。これは従来の操業経験にもとづいた炉況を定量的に評価するシステムと、炉内熱レベルや溶融帯形状を推定するシステムとを組み合わせて高炉操業をパターンとして把らえ、時経列的な推移を管理するための機能を備えたシステムである。

炉熱予測を行うモデルは熱収支、物質収支を基本とする理論モデルと、炉熱に影響する要因の係数を回帰分析などで求める統計モデルがある。溶融帯の位置、形状を推定する方法としては炉頂の半径方向のガス温度、組成から反応、伝熱、ガス流れを考慮した数式モデルや炉壁の圧力分布から推定する方法がある。

総合的な操業管理の一つとして高炉の長寿命化を目的とした耐火物侵食管理、炉体温度管理、付帯設備管理などから構成される設備診断システムが考案された。

高炉研究に特徴的な長期的、多種類の操業データを解析する手段として計算機を利用した対話型データ解析システムが考案された。特徴は高炉操業データを自動収集し、高炉別に火入れ以来の一炉代分のデータを蓄積し、CRT ディスプレイから対話形式で検索したい炉号、項目、期間を設定することで作図、作票、統計計算を行うことができ日常管理や高炉操業解析を容易にしている。またネットワークを介し研究所や製鉄所を結合すること

で最新の研究成果の早期活用や汎用解析の利用が可能とするシステムも開発されて実用化している。

今後は多様化するニーズと、新技術が計測制御技術に定着しつつある中で更に炉況や操業アクションの定量的把握に必要なセンサーの開発が進み、総合的な高炉操業管理システムのレベルアップが図られていくと考えられる。一方これまで開発された多くのセンサーについて再評価を行い、その計測値の意味と操業管理上の目的を明確にして今後の開発すべき方向を見直すことも重要であろう。

### 4.7.3 製 鋼

#### (1) 転炉の計測・制御

転炉のダイナミック制御を始めとする昭和 40 年代に芽生えた各種の技術が、過去 10 年間に定着、実用化され生産の合理化に大きく寄与した。一方、精錬プロセスそのものが複合吹錬法の普及、溶銑予備処理法、取鋼精錬法の発達と多様化してきており、高級鋼製造、製造コスト低減の両面から、溶鋼成分の高精度迅速分析など成分計測技術への高度な要求が急速に高まっている。

#### (a) 転炉のダイナミック制御

サブランスと複合プローブにより吹錬中の溶鋼Cと温度を直接測定して終点を制御する、いわゆるサブランスダイナミック制御が広く普及し、C、温度同時適中率も 85~95% に至り無倒炉出鋼も実用化された。また、炉内反応機構の解明、吹錬物質収支、熱収支のダイナミッ

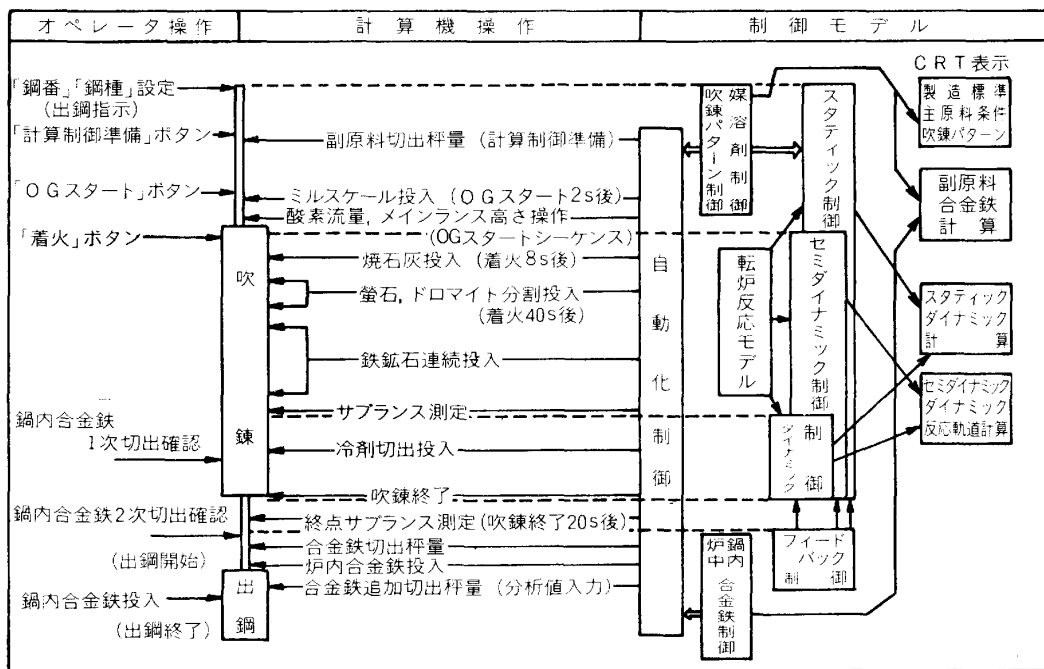


図 4.7.6 転炉自動吹錬システム  
(田中ら：日本鋼管技報, 73 (1977), p. 12)



クなモデル化も進められ、これらを組み合わせて、酸素流量、ランス高さの自動操作、副原料の自動切出投入、サブランスによる自動測定、終点自動吹き止めなどの一連の吹錬作業と合金鉄調整作業がコンピュータにより自動化された。この一例を図 4.7.6 に示す。マイクロプロセッサを始めとするコンピュータの発達により、吹錬の軌道など刻々の情報がリアルタイムに CRT 表示される。また、上位の工程管理コンピュータからのオンライン指令によつて吹錬作業が遂行される総合的なシステムも一般化された。

終点制御に関しては、品質、歩留り上から、C、温度だけでなく P、Mn や出鋼量の制御が要求されるようになり、新たな吹錬情報の活用を求めて多くのアプローチがなされ、これらを取り込んだ自動吹錬システムに拡張されつつある。

#### (i) 排ガス情報の利用

吹錬の投入酸素量と排ガスの持ち去る酸素量の差から炉内残留酸素量を計算し、反応モデルと組み合わせて鋼浴の P、Mn などを推定する方法がとられている。排ガス分析計、流量計の誤差、時間遅れなどから厳密な推定は困難であるが、物質収支が直接推定される点に特長がある。

ガス分析については時間遅れ対策の一つとして、炉頂部でのドライサンプラーの採用が進められ、高精度化の方向としては  $N_2$  も分析して誤差を補正できる質量分析計の適用も試みられている。

#### (ii) スラッグ情報の利用

吹錬中のスラッグ生成挙動を何らかの方法で把握し P、Mn の推定に利用しようとする試みがなされており、ランス振動、炉体振動、吹錬音変化、マイクロ波などによるスラッグレベルの計測が行われている。特に、ランス振動の情報を利用してランス操作で滓化制御を行い適中率を上げた例もある。

これらは同時にスロッピングの予知、制御にも利用される。

#### (iii) 直接分析

サブランスにより吹錬中の溶鋼サンプルを採取して、通常の発光分光分析法で成分を直接分析し終点成分を推定する方法も行われているが、分析時間が必要なため修正アクションがとれない問題がある。一方、酸素濃淡電池を原理にした溶鋼中酸素センサーが転炉にも使用され始められ、鋼浴 O の測定から P、Mn を推定する方法が今後期待できる。センサーの構造を図 4.7.7 に示す。

なお、この酸素センサーは取鍋での脱酸コントロールにはすでに広く使用されている。

#### (b) 省エネルギーおよび炉体延命のための計測制御

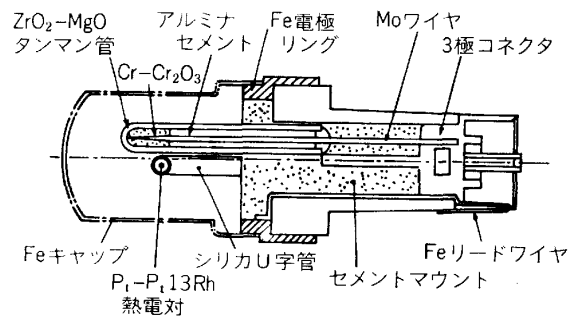


図 4.7.7 溶鋼中酸素センサー  
(永田ら：鉄と鋼，67 (1981)，p. 1899)

省エネルギーに関しては排ガス回収制御が普及し大きな効果があった。ガス分析計の遅れ短縮、精度向上により回収開始、終了を極限まで延長すると同時に、反応モデル、排ガス情報と制御理論を用いて、吹錬操作に応じた炉内ガス発生量を予測し炉内圧を制御する回収方式がとられている。また、Induced Draft Fun (IDF) の VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 方式などによる回転数制御も省電力上効果が上がっている。

炉体の設備診断計測に関してはレーザやマイクロ波の距離計を使つた炉体プロフィールメータが実用化され、自動耐火物吹き付けを行つている例もある。また、赤外線サーモカメラも炉体の監視に利用されている。複合吹錬では特に底吹きノズルの寿命が問題であり、多芯熱電対センサーによる温度変動伝播遅れ、もしくは電気抵抗変化の検出から耐火物厚みを計測する侵食量計が開発された。

#### (c) 精錬法の多様化と計測制御の今後の課題

製鋼精錬プロセスは多様化、連続処理化の趨勢にあるが、計測面でも基本となる成分、温度、重量の計測に関して迅速化、連続化が望まれている。特に、成分のオンライン直接分析では各種固体電解質センサー（酸素センサーは一例）やレーザなどによる直接発光分光分析法が研究され始めている。さらに、鋼品質のコントロール上からはいつそう高精度な分析機器の開発も必須である。また、耐火物に関しても損耗状況計測のための低コストで使いやすいセンサーの開発が強く望まれている。

#### (2) 連続铸造の計測・制御

過去 10 年間の連続铸造法の発達、普及は目覚ましいものがあり、高品質無手入れ化、高速高生産性化、連铸・圧延直結化など数多くの技術開発が進められた。この中で铸片品質の計測制御、コンピュータによる自動化、総合システム化の開発が重要な役割を演じた。しかし、凝固プロセスの本質に迫る計測技術に関してはまだ模索状態にあり、今後の連铸技術の発展に対しての課題であろう。

(a) 鑄片品質の計測制御

(i) センサー技術の開発

連鑄鑄片の品質はモールドの中で決まるといわれており、鑄造状況を評価するためにさまざまな原理に基づく各種のセンサーが開発、設置されてきている。これらを一括して表4.7.3に示す。現状、各センサーはそれぞれに効果を上げているが、鑄造プロセスをダイナミックに浮き彫りにするまでには至っていない。これらの中でモールド溶鋼レベル計は湯面制御によつて大きな効果を上

げ、必須のものとして定着している。

(ii) モールド溶鋼湯面制御

溶鋼レベル計としてはさまざまな方式が開発されており、主な方式を図4.7.8に示す。昭和40年代には放射線式、熱電対式が実用化されていたが、取扱管理の煩雑さや応答性に問題があり、過去10年間に電磁式が主流となつた。特に差分型帰還増幅回路を用いた渦流レベル計は小型で広測定範囲、高精度なものを実現している。これらのレベル計を使つた湯面制御は湯面の安定によつ

表 4.7.3 連続鑄造の品質計測センサー

センサー	目的	方式	実用化度
レードルスラグ流出検知	介在物低減	電磁判別、ノズル振動判別	◎
モールド 溶鋼レベル	溶鋼湯面制御、品質向上	渦流(帰還増幅)、電磁結合、磁束平衡 放射線、熱電対、電極、光学	
モールド パウダー溶融層厚み	パウダー流入状況監視、パウダー投入	2周波渦流	○
” 凝固層厚み	冷却凝固状況測定	電磁超音波	
” 鑄片接触状況	パウダー流入状況監視	超音波	
” 鑄片摩擦状況	ブレイクアウト予知、表面疵予知	モールド振動加速度、伝達関数	
” 温度分布	ブレイクアウト予知、抜熱量測定	モールド埋め込み熱電対	
” 短辺テーパ	モールド幅管制御、冷却制御	差動トランス、電磁変位計	
モールド直下 パウダーフィルム厚み	パウダー流入状況監視	多波長放射温度計	◎
” 鑄片表面温度分布	ブレイクアウト予知、鑄造状況監視	光ファイバー2色温度計	
” 鑄片短辺形状	ブレイクアウト予知、鑄造状況監視	水流超音波距離計、差動トランス	
2次冷却 鑄片表面温度分布	2次冷却制御、品質向上	2色温度計、プラン付放射温度計	◎
” 凝固層厚み	2次冷却制御、凝固完了位置推定	電磁超音波	
” ロール反力	凝固完了位置推定	ロードセル	
熱間鑄片 厚み	鑄片バルジング測定、単重計算	差動トランス、レーザ距離計	○
” 幅(形状)	鑄片バルジング測定、単重計算	差動トランス、レーザ距離計	
” 表面疵	鑄片運用・手入れ、操業フィードバック	高圧水銀灯・カメラ、レーザスキャン、加熱温度パターン	
” 表層下欠陥	鑄片運用・手入れ、操業フィードバック	渦流探傷	
” 内部割れ	鑄片運用・手入れ、操業フィードバック	電磁超音波探傷	

◎：一般に普及 ○：普及しつつある 無印：試用段階

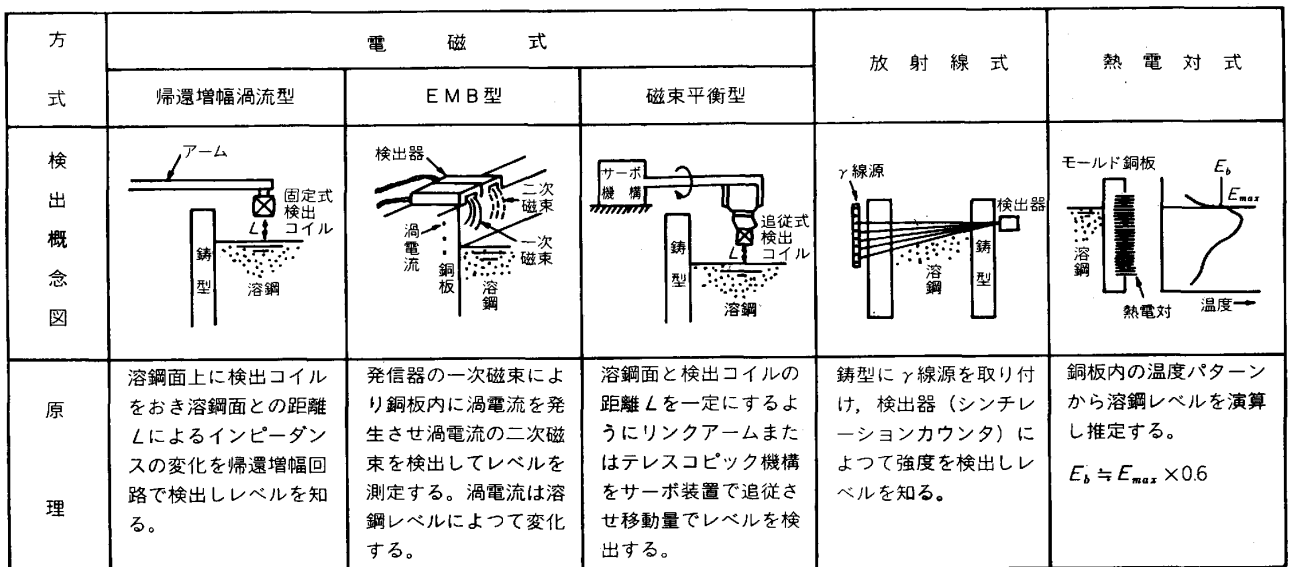


図 4.7.8 溶鋼レベル計原理比較

(松永ら：製鉄研究(1984)313, p.3 一部修正)

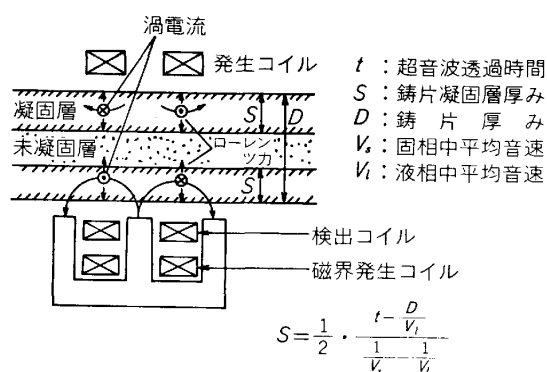


図 4.7.9 電磁超音波による凝固層厚み測定原理  
(日本鉄鋼協会共同研究会：第 84 回計測部会 (1983 年 7 月) 新日本製鉄(株) (私信))

て表面疵の発生を大幅に減少させた。制御の操作はタンディッシュからの注入量をストップまたはスライディングノズルで調節するのが一般的であるが、小断面のビレットなどでは引抜速度制御でも行われる。

### (iii) 2次冷却制御

連铸機の世界情報からコンピュータにより铸片位置をトラッキングして、どの部分でも比水量を一定とする制御は一般的に行われていたが、铸片表面温度をフィードバックしダイナミックに表面温度制御する方式が開発、実用化された。矯正ゾーンでの温度制御、幅方向温度分布均一化が疵発生防止から重要である。表面温度計としては2色温度計が一般的になっているが、放射率の評価、スケールの影響の問題があり、これらを改善する回転ブラン付放射温度計も開発されている。また、凝固層厚みをモデルによる推定または図4.7.9の原理の電磁超音波法により測定して、冷却過程およびクレータエンド(凝固完了位置)を制御する方法も開発された。

### (iv) 電磁攪拌、圧縮铸造制御

電磁攪拌についてはいまだ鋼種、铸造条件により定められた基準のプリセットの域を出ない。圧縮铸造とは湾曲型連铸機矯正点での内部応力を制御し内部割れを防止する新しい技術であり、凝固層厚の情報によりピンチロール群をマイクロコンピュータなどによりリアルタイムに制御する。

### (v) 熱間表面疵検出

熱片加熱炉装入、熱間直送圧延の要請から光学式、渦流式など各種の方式が開発されており、主な方式を表4.7.4に示す。光学式では疵自動判定のためにいずれも疵情報の画像処理が必要でありこの開発に力が注がれている。渦流式では磁気変態点の影響があるため铸片を部分的に加熱溶削して、むしろ表層下の欠陥を検出しようとするくふうもある。一方、操業技術の改善で無欠陥化の方向が推進されており疵検出の必要性には議論もあるが、品質レベルの維持、向上と直送圧延の自動化を主眼

表 4.7.4 熱間表面疵検出原理比較

方式	原理	
光学式	レーザ走査型	Arレーザの極細ビームをスラブ表面に走査して、散乱光の強度から疵を検出する。
	ITV型	高圧水銀灯などの光をスラブ表面に照射して、疵部の輝度差をITVでとらえ二値化して検出する。
	リアアレイ型	ITV型と同様であるが、輝度差をリアアレイカメラまたはCCDカメラでとらえる。
誘導加熱式	高周波誘導加熱コイルにより疵部を局部的に昇温し赤外線温度計により検出する。	
渦流式	直交インピーダンス比較型	直交した2組の方形コイルでスラブ面を高周波励磁し、インピーダンスの変化分の差を疵として検出する。
	交叉コイル型	高周波励磁コイルによりスラブ面に渦電流を発生させ、疵による検出コイル前後の磁界アンバランスを電圧で検出する。
	回転コア型	コアを埋設した大径コイルを回転させて、直下を渦電流により探傷して2次磁界によるインピーダンスの変化を検出する。

に実用化が進められている。

### (vi) 設備診断計測

铸片の品質は操業技術とともに連铸機の正常な動作で決まる。特にこの中で、ロール間隔およびロールライメントの管理は重要であり、従来人手に頼っていたこれらの測定が機械化された。基本となるロール間隔測定はダミーバー先端などに装着した差動トランス、ポテンシオメータなどの機械的変位計で行われ、耐久性設計、データ伝送方式などにいくつかのくふうがみられる。また、スプレーノズル詰まり監視、ロール軸受監視の自動化の試みもなされている。

### (b) 連続铸造プロセスの自動化、総合システム化

铸片品質の向上、省力化、工程管理システム化などの要請から、連铸プロセスはマイクロコンピュータを活用して全面的に自動化される趨勢にある。連铸計測制御システムの一例を図4.7.10に示す。前述の铸片品質に関する計測制御に加えて、レードルおよびタンディッシュの测温・サンプリング、レードルからタンディッシュへの注入制御、铸造のオートスタート・ストップ、モールドパウダ自動供給、铸造速度制御、铸造幅替制御、铸片最適取り合わせ切断制御、铸片の自動マーキング、自動ハンドリング、と一連の作業がコンピュータによる铸片トラッキングをベースにすべて自動化され、これらの状況はCRTで集中的に監視される。特に、铸込床作業の機械化、ロボット化に意が注がれてきており、従来の連铸機より大幅に省力化された。

さらに、システム化への要請として铸片品質予測システム、熱片装入、直送圧延工程運用システムがある。铸片品質にかかわる多数のセンサー情報を铸片位置に対比させ、評点付けにより品質レベルを推定しようとする試

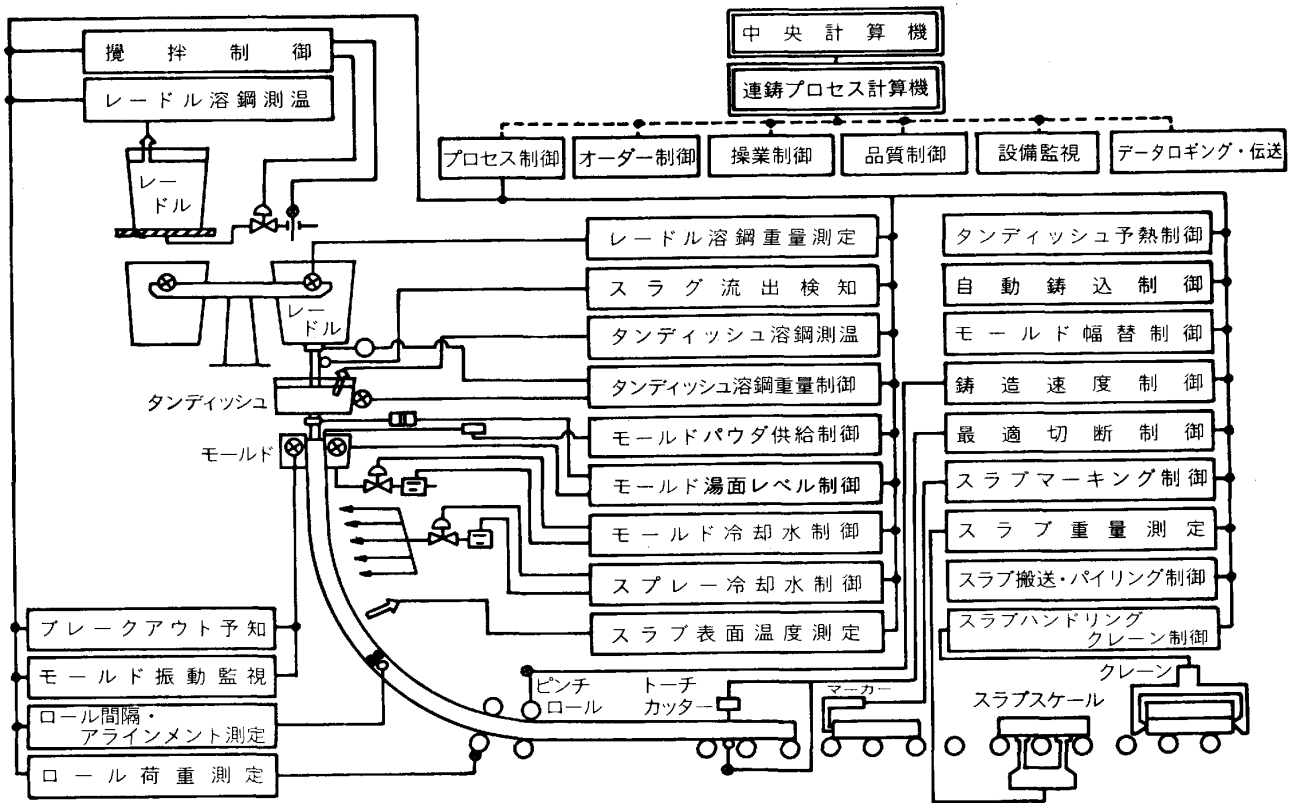


図 4.7.10 連続铸造プロセス計算機制御システム  
(佐藤ら：川崎製鉄技報，14 (1982)，p. 39)

みが行われており、直送圧延のリアルタイム品質判定に欠くべからざる技術となつてきている。また、铸造中の品質判定により切断変更を行う技術も開発されつつある。直送圧延に当たっては、铸造プロセスだけでなく精錬プロセス、圧延プロセスまで一貫して物流同期をとるの必要があり、製鉄所全体の生産計画・管理を踏まえた大規模なシステム化が推進されつつある。また、直送圧延では圧延プロセスに対応した高速、高温、無欠陥铸造技術が必要であり、これまで述べた各計測制御技術はこの大きな支えになつている。

(c) 連続铸造技術の発展と計測制御の今後の課題

連続铸造製品がますます高級化する中で铸件品質の計測制御は今後とも重要な課題である。現状は多種多様なセンサーにより模索している段階といえるが、さらに理論的な裏付けのもとに品質の計測制御を体系づけ、操業の総合的な指標ないしはキーとなるセンサーを浮き彫りにしていく必要があろう。また、薄型連続などの新技術に対しては新たな観点からのアプローチが必要となろう。なお、省力化、高生産性化の面からは段取作業、設備診断作業、整備作業のいつそうの機械化が重要である。

4.7.4 薄板圧延

(1) 計測

この 10 年間、従来の量産化努力よりもむしろ製品品質向上、省エネルギーと原単位低減、歩留向上によるコスト削減努力への要請が強くなり、計測ニーズもこの時代の動向を反映した変化があつた。またエレクトロニクス技術の進展に基づく計測シーズ技術の進歩があつた。

(a) 計測ニーズの変化

板厚測定では、板の中心部 1 点の測定から、板幅方向板厚プロファイルの測定へと線測定のニーズがでてきた。板幅、板形状測定では、単なる板幅測定から、板幅方向、長手方向スキャンによる寸法測定、ならびに板面上のたわみを表す波高値と板の局所的な変形を示す急峻度の測定など面上特性分布の測定ニーズが強くなつている。温度測定では、測定の再現性のみならず真温度測定も含めたものへ、800°C 以上の中温域測定から、200°C 前後の低温域まで含む広範囲测温へのニーズの変化があり、表面疵に関しては、疵の大きさのレベル測定から、欠陥種別の判別も含めたオンライン欠陥判別のニーズが強くなり、また板表面粗度等の板表面性状の測定ニーズが出てきた。表 4.7.5 に熱延・冷延・表面処理プロセス別の主要ニーズの変化例を示す。

(b) 計測シーズ技術の進歩

表 4.7.6 に進展のあつたシーズ技術とこれに対応する具体例を示す。

表 4.7.5 計測ニーズの変化とその具体例

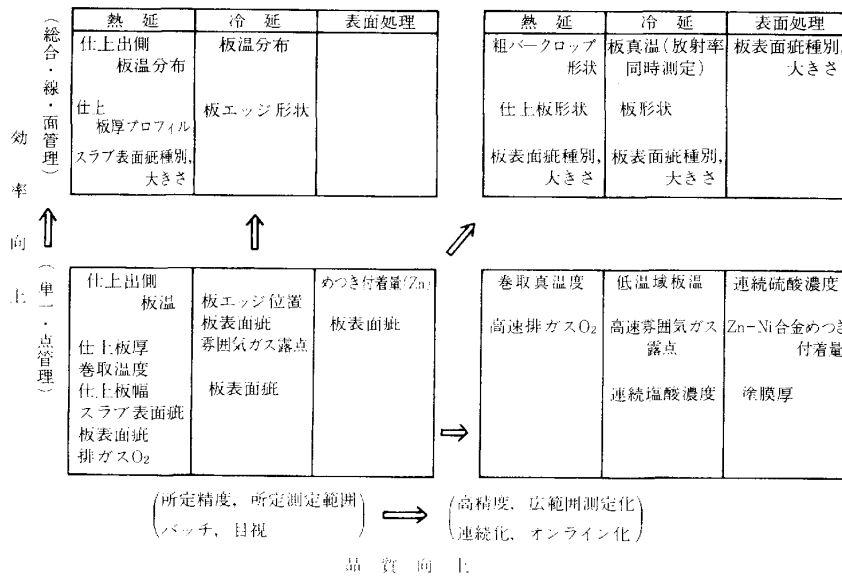


表 4.7.6 計測シース技術の進展

	熱 延	冷 延	表面処理	熱 延	冷 延	表面処理
信号演算 処理技術	放射率補正 板温度計 X線厚み計	放射率補正 板温度計	比色-比重, 電導度-比重式 酸濃度計	板厚 プロフィールメーター	板放射率, 温度 同時測定	電気滴定式 酸濃度計 Zn-Ni合金めつき 厚計
高性能検出 素子	固定演算回路			マイクロ・コンピュータ適用		
	Si温度計	Si温度計		CCD温度計 CCDロール疵 検査装置	CCD温度計	塗膜厚計
パターン処理 技術	半導体変換素子			高性能半導体変換素子, 積層型半導体(IC)適用		
	多点温度計	磁歪式形状計		走査型温度計 クロップ形状計	電磁相関形状計	
非接触測定 技術(波動利用)	並列測定の読み取り			パターン処理ソフト		
	熱放射	板温度計			板放射率, 温度 同時測定	測色計 表面疵検査装置 塗膜厚計
	レーザ			速度計 形状計	形状計	表面疵検査装置
	電磁波			スラブ疵 検査装置	着磁式速度計 鋼板硬度計 電磁相関形状計	
電磁 超音波			スラブ内部疵 検査装置			
設備診断 技術	聴音棒			非接触測定技術の進歩		
				軸受振動波形 測定 油圧圧力波形 測定 ロール表面疵 検査装置		
	感覚的, 一面的			客観定量的, 多面的		

(c) 薄板圧延における計測技術の進展例

(i) 寸法・形状

最近、鋼板幅方向厚みプロフィールと形状測定ニーズが強い。幅方向厚みプロフィール測定のためには、X線厚み計2台を組み合わせた例がある。鋼板形状測定のためには、レーザまたは棒状光源からの照射光を利用する方式、電磁相関方式等がある。レーザ方式は、波高値の検出精度はオフラインにおける実測値との対比で±1

mm程度である。電磁相関方式は鋼板に一定同期で張力を加える印加装置、鋼板の変位量を検出する静電容量型変位計と張力・変位量の相関関係から鋼板各部における張力分布と鋼板の急峻度を求める信号演算処理部からなっており、急峻度の検出精度は実測との対比で±0.2%である。粗パークロップ形状測定方式として、粗バーからの熱放射を受光して形状を判定する自発光方式と粗バーの下面に光源を設置し、粗バーによる遮光を利用して

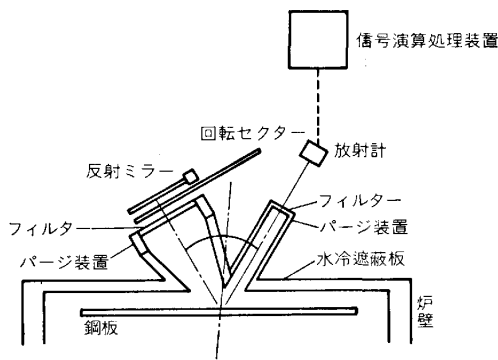


図 4.7.11 鏡面反射を利用した放射率、温度同時測定装置例  
(井内ら：鉄と鋼，69 (1983)，S1156)

形状を判定する下部光源方式がある。自発光方式は粗バーのトップ、ボトム映像信号検出用のリニア・アレイ型温度分布検出素子と画像処理、形状認識装置からなりつつあり、その検出精度はオンラインで  $\sigma = \pm 2\%$  以内であり、最適切断制御のための形状信号を出力するものである。

#### (ii) 鋼材温度

最近では、板温の再現性指向と共に真温度測定指向がなされている。測定方式として外部光、熱源の影響を防止する遮蔽板のある方式、板の放射率変動の影響を防ぐため多重反射板を利用する方式と熱放射の一部を鏡面反射させ、取り込み演算処理する方式等がある。図 4.7.11 に連続焼鈍炉に設置されている鏡面反射方式の構成例を示す。熱延加熱炉内スラブ表面温度測定用としては、炉内温度が高温であるため非水冷型遮蔽板、スラブ表面からの直接入射する放射量を測定する放射計と遮蔽板自身の放射量を測定する放射計を配置し、両信号を演算処理するとにより真温を求める方式のものが採用されている。鋼板幅方向温度分布測定装置として、PbS または Si 検出素子、走査器、信号処理部からなり、毎秒 40 回の走査周期で走行中の鋼板表面温度分布を測定する方式のものがある。

#### (iii) 鋼材表面疵

疵検出方式として、ストロボ併用 ITV 方式、レーザーまたは白色光源を利用した飛像式、飛照式、渦電流方式等がある。現時点では、いずれの方式も検査員の目視判定と比較して、対象とするすべての疵を判別し、検出率、過検出率の目標を達成するには、2, 3 の例外を除いて、十分ではなく、目視検査との併用が多い。本件については、今後の高性能疵検出器の開発と疵判定信号処理ソフトウェアの性能向上が望まれる。スラブ表面疵検出器として、ITV 方式、レーザー飛照式、写真式等の光学方式、温度計方式、渦電流方式等がある。温度計方式の一つとして、スラブ表面を誘導加熱し表面温度差を与え、疵を

顕在化させ、疵検出する方式のものがある。このシステムは誘導加熱装置、赤外線温度計、疵判別装置からなりつつあり、縦割れ検出率 90% 弱の検出能力をもっている。またスラブ内面疵検出のため、電磁超音波方式のものも設置されている。

#### (iv) 鋼板表面性状

表面粗度測定方式として、従来の触針式に代わるレーザー反射光方式の採用が、硬度測定方式として、鋼板を磁化し、その大きさから硬度を求める方式のものがある。めつき厚み測定方式として、めつき部に照射した放射線により発生する二次 X 線 (蛍光 X 線) のスペクトル強度からめつき成分の厚みを求める蛍光 X 線方式のものが採用されている。

#### (v) 溶液分析

酸濃度の測定には、従来からの電導度-比重による演算方式と最近登場してきた電気滴定方式が使用されているが、測定値の再現性が十分ではない、サンプリング装置の保守に労力を要する等の問題があり、十分に実用化されているとは言えない。

めつき液中の金属イオン濃度測定方式として、サンプリングした溶液を蛍光 X 線分析装置を用いてオンラインにて測定する方式が採用されている。

#### (vi) ガス分析

O<sub>2</sub> 測定方式としては ZrO<sub>2</sub> 素子を用いた高速応答方式のものが採用されている。露点測方式として、塩化リチウム式、赤外線式、鏡面冷却式等があるが、応答性の面では赤外線式が優れている。

#### (vii) その他

鋼板走行速度測定器として、レーザー速度計の適用がなされつつあるが、雰囲気中の水蒸気、鋼板上の水滴、水塊の影響等によるノイズがあり、十分に使いこなされていない。

圧延圧下力測定用ロードセルとして、ストレンゲージ、静電容量、磁歪方式のものが採用されており、小型電子部品の適用による MTBF の向上と大容量タイプの国産化がなされてきている。

熱延をはじめとするプロセスにて設備診断用測定器が採用されはじめた。測定対策としては機器の振動、変位、油圧、表面疵等がある。測定方式としては振動計、変位計、圧力計、渦流探傷法または ITV によるロール疵判別法があり、今後機器およびソフトウェア両面にわたる発展が期待される。

#### (2) 制御

前に述べたような計測技術の進歩とともに制御技術に関しても、ここ 10 年の間には見るべき多くの進展があつた。それには制御技術個々の技術の進歩発展 (シーズ

の変化)が薄板圧延の分野に積極的に適用拡大されていった面もあり、一方では薄板圧延の進歩発展から制御技術に対する種々の要求(ニーズの変化)がなされた面も多い。

シーズ面の特徴的な変化としては①制御用計算機が高速・大容量化したこと、②マイクロコンピュータが安価になり著しい普及をみたこと、③このような計算機の発達に伴って、いわゆる現代制御理論を含む新しい制御理論が実用的にも応用の対象となってきたこと、などが考えられるが、薄板圧延の分野では生産量の大きさからくる経済効果への期待からこれらの積極的な適用が試みられ、①制御モデルをはじめプロセスコンピュータが規模・内容ともに高度化し、②シーケンサ、調節計などがプログラマブルなコントローラにおきかわり、ソフト化が進むとともに、デジタルAGCなどのようなデジタル化が進み、③また多変数制御系としてとりあつかわれ、最適化、適応化なども組み込まれるようになった。さらに狭義の制御に限定されず、設備診断、プロセス診断などの新しい考え方が、具体的にいち早く当分野にとり込まれたことも注目すべきことである。

一方、ニーズ面から見ると、既存の圧延プロセスにおいても、①板厚・クラウン・形状など精度面での品質向上が限りなく要求され、②一方では省エネルギーの要求はますます厳しく、極限の操業が追求された。例えば、加熱炉の省エネルギー→最少燃料加熱制御→スキッドマーク残り→AGCの改善要求といった関連に見られるよ

うに上述のニーズから種々の新しい制御技術課題を提起してきたが、さらにはプロセスそのものが変革され、例えば、①直結化・連続化が進んだこと、②6重ミルなど新しいミルの実用化などが特筆されるが、このような制御対象そのものの変化が、新しい制御技術を要求し、またこれに応えた種々のシステムが確立されてきたことも注目すべきであろう。

以下、各工程ごとにここ10年間での特徴的と思われる主な制御項目について簡単にふれておこう。

(a) 熱延における主な制御技術

図4-7-12は近年稼働した新熱延工場におけるプロセスコンピュータシステムのハードウェア構成図である。昭和40年代後半に稼働したシステムと比較して、CPU台数にして数倍(ただしマイクロプロセッサを含むと比較できないほどである)主記憶容量で10倍、補助記憶容量では100倍を超える。カード、紙テープ等を媒体とする端末が姿を消し、ほとんどCRT・キーボードになったこと、データ・ウェイ方式が採用されるようになったことなど大きな変化の跡が見られる。さらに今日でも、32ビット・マシンの一般化、光通信のプロセスコンピュータ分野での適用・普及などこの分野での進歩は休みなく続いている。以下では特にプロセスコンピュータに限定せず各設備での主な制御項目を述べる。

(i) 連続加熱炉の制御

省エネルギーの代表的工程として、制御面からも熱効率向上の努力がなされた。排ガスO<sub>2</sub>制御のデジタル計

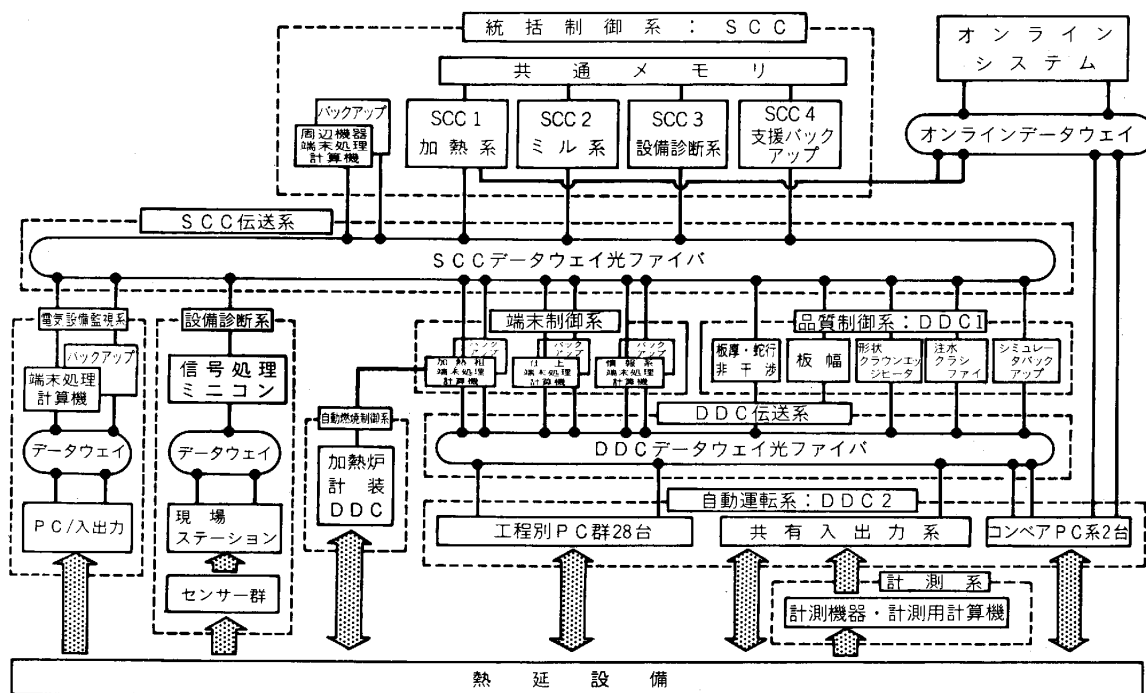


図 4-7-12 熱延工場計算制御システム構成の一例 (小笠原ら: 鉄と鋼, 69 (1983), S1087)

装による制御精度の向上, 燃料流量に応じた  $[O_2]$  の最小目標値の設定, 燃焼用空気ブローの VVVF 化による吐出圧の調整など, きめの細かい制御が行われるようになった。またプロセスコンピュータによる加熱制御も, スラブ一本ごとのダイナミックな温度推定, 最短在炉時間計算, 最適炉温設定など新しい制御用数式モデルが導入され, 省エネルギー努力がはかられている。これらは連铸との直結化による熱片の装入, 熱・冷片の混在など新しい問題に対応するためのものでもあり, また最近の経済的不況下での特徴としての低操業率下での効率的な操炉方法をも含めて, 今後とも改善が進むであろう。

#### (ii) 粗圧延機の制御

特に新しい制御機能は見られないが, 板幅制御, そのための初期設定モデルの向上, 頭尾部のショートストローク制御の最適化など改善開発が続けられた。

#### (iii) 仕上圧延機の利用

仕上圧延機では, 種々の改善がみられる。板幅, 板厚などの寸法精度の向上が求められ, 一方では, 前述したようなスキッドマーク対策など, 制御に対する要求も厳しくなってきた。このため AGC のデジタル化が進みプロセスコンピュータシステムの一部を構成するようになったり, フィードフォワード制御など制御ループも増してきている。極厚物対応からルーバーが大型化する一方では, 上記寸法精度の方からはその制御性能の向上が望まれ, 最適レギュレータなどの現代制御理論を用いた制御システムの構築が検討されている。形状・クラウン(プロフィール)制御はここ 10 年間で最も特徴的なものの一つであろう。6 重ミルの適用, クロス・ミルの開発既存ミルでの改造が行われ, これに伴って形状検出, あるいはプロフィール検出器(オンライン用)の開発とともに, 制御システムが開発され, 適正な形状, クラウンを得るためのミルの初期設定とともに, コイル内の変動をも抑制する閉ループ制御が設けられた。この結果クラウン目標を低くして, 幅方向均一厚に近い低クラウンの板が作られるようになり, ばらつきの減少とともに歩留り向上にも寄与するようになった。形状とクラウンは互いに関連しあうものであり, 二つの目標を同時に, 複数スタンドを使つて制御していくこととなり必然的に多変数制御系となり, 新しい制御理論による取扱いが必須となる。

クラウンが小さくなると, 板の蛇行の可能性が増し, 従つて, 蛇行制御が従来に増して重要な課題となる。このため, 両サイドの圧下力差にもとづく制御, あるいは蛇行検出器を設置した制御システムが開発されつつある。

直送圧延あるいは低温抽出によるスラブあるいは粗バ

一の端部の温度低下に対して, プロフィール精度, ロール摩耗対策等の面から, 誘導加熱による端部加熱の技術が開発され, これに伴つて, 板端部に適正な昇温を与える制御システムも新しいものの一つである。

スタンド間に各種装置の設置を可能にし, かつ設備費の低減をはかるために, ルーバーを用いずにミルの速度調整によるスタンド間張力制御が検討され, 板厚の厚い上流スタンドでは一部実用化された。

CC-HOT の直送率を向上させるには生産ロットを固定しない, いわゆるスケジュール・フリー圧延が必要である。このため, プロセスコンピュータの主課題であるミルのセットアップ用の数式モデルも従来とは様相を異にしてきた。

すなわち, 直前の圧延実績による学習効果を主体とするモデルでは不十分となり, “試圧一本目” から適用可能なようなモデルが要求されるようになった。このようことから圧延理論に基づいた各種の数式モデルが用いられるようになり, モデルに用いられる物性値パラメータの妥当性が一段と厳しいものになるなど, 数式モデルにも多くの変化が見られる。

#### (iv) ランアウトテーブル・巻取りの制御

巻取温度制御, 巻取り機の初期設定などが主体であり, 従来と項目的には大きな変化はないが, 内容的には新しい制御理論の適用など改善が試みられている。熱延ストリップの材質を作り込むという観点からは今後各種の制御技術課題が提起されることが考えられる。

#### (b) 冷延における主な制御技術

タンデムミルの完全連続化, 酸洗ラインとの直結化, 高圧下ミルの出現などプロセスの変化に対応した各種の新しい制御システムが冷間圧延におけるここ 10 年間の特徴と言えよう。

##### (i) 酸洗ラインの制御

酸洗ラインの計算機による制御はすでに昭和 49 年代後半に開発され, その後大きな変化は見られないが, 最近では酸洗に代わる新しいデスクレーンングプロセスの研究も報告されており, 今後これに対応した制御技術が要請されることも考えられる。

##### (ii) 圧延ラインの制御

冷延における制御項目の代表である板厚制御 (AGC) は板厚精度向上の要求に応えるために, デジタル化, 多変数制御理論の適用など, 通板・加減速部を含めて改良が続けられている。完全連続ミルでは非定常圧延部のオフゲージ問題は緩和されたが, 走間板厚変更という新しい課題を提起した。この技術は昭和 40 年代後半すでに見られたが, 50 年代になつて完全連続ミルの普及に従つて, 改善が進んだ。



形状制御は熱延同様（むしろ先行した）ここ 10 年間の特徴的なものであろう。幅方向の伸び率の差異という形状情報を数個（2～4個）のパラメータで表現し、多変数制御系として取り扱っている。

(c) 冷延鋼板連続焼鈍ライン

深絞り用冷延鋼板の製造が従来のバッチ式焼鈍に代わって連続焼鈍+調質の直結ラインが 40 年代後半から 50 年代にかけて急速に普及し、50 年代に入つて、このラインにも計算機制御が行われるようになった。その機能としては、自動減速、溶接条件、炉内張力、調質ミルなどの自動設定のほかに適切なヒートサイクルを実現するための板温制御が中心となる。プリセット値計算、温度計情報によるダイナミック制御を含んでいる。

(d) 表面処理ライン

表面処理ライン固有の制御機能は目付量など表層薄膜の厚みの制御が主体となるが、多くはその検出法が課題であり、開発の主力もそこにある。ただし検出が不可能になるため、電圧・電流等の容易に計測可能な情報から数式モデルによつてぶりきの合金層厚を間接測定して、これを制御する方法などの制御技術の活用例もある。

近年、新しいめつき製品、あるいはその製造ラインが開発され、それに対応して自動運転、ラインの効率化を目的とする計算機制御も同時に導入されている例も多い。

4.7.5 厚板圧延

鉄鋼業は受注生産を基本としているが、なかでも厚板は典型的な多品種小ロット生産である。しかも、素材（スラブ）から製品に至るまでには多くの工程を必要とし、かつ素材の流れも複雑である。このようなプロセスにおいて、コスト低減をはかり、かつ需要家の厳しい要求を満足する製品を円滑に生産するには、膨大な情報とそれに基づく精緻な操業が不可欠である。この命題を解決する効果的な手段が自動化であり、生産管理、プロセス制御、センシング等のあらゆる局面において、自動化技術の開発が、昭和 40 年代より続けられてきた。幸いにもこの間、自動化技術の基盤となるコンピュータ技術、エレクトロニクス技術が飛躍的な進歩を遂げた。鉄鋼業はこれらの技術を積極的に導入、消化することによつて上位生産管理システムから末端のセンサー等に至る、個々の課題を解決してきた。さらに、これらと生産管理システムを頂点として一体化し、厚板工場全体の最適操業と、受注から出荷に至る一貫管理を遂行する、厚板トータルシステムを構築することによつて、厚板製造技術の質的向上をはかつてきた。その一例として図 4.7.13 に川鉄水島、厚板トータルシステムを示す。

以下に、厚板圧延における主要工程の自動化に関する最近の進歩について概説する。

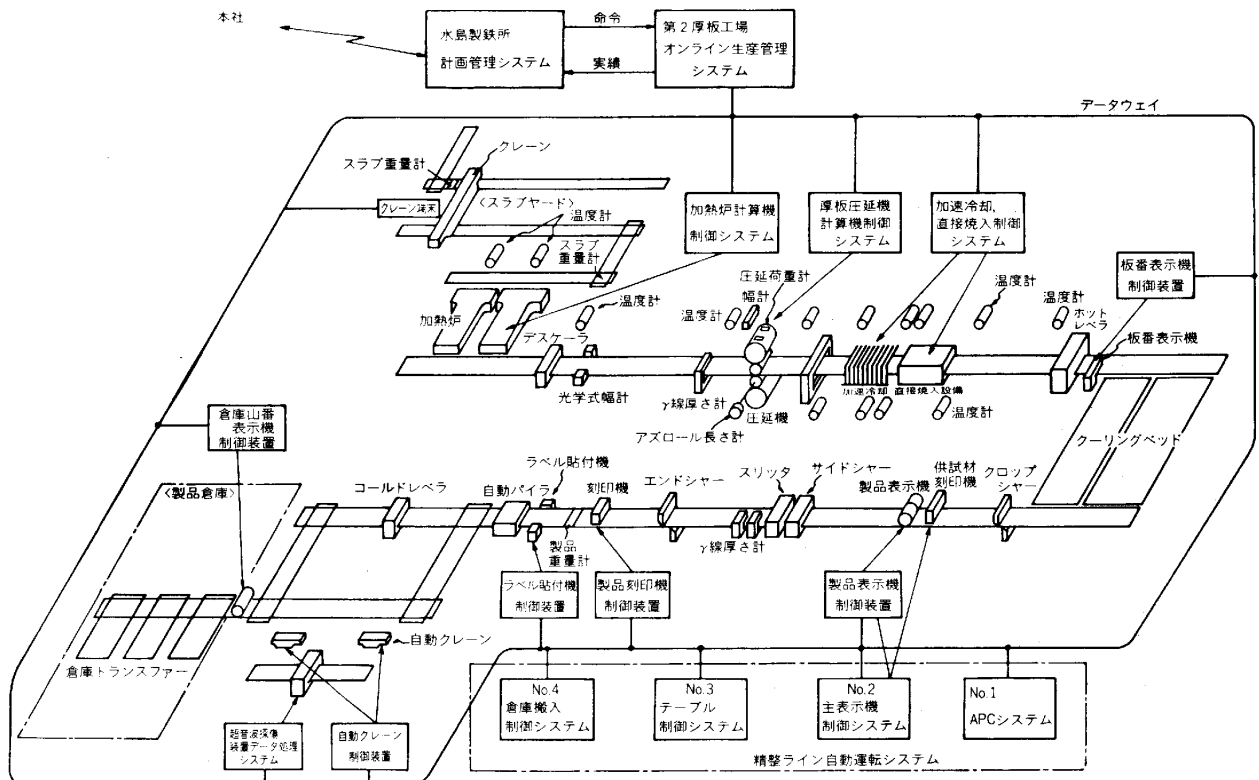


図 4.7.13 川鉄水島厚板トータルシステム

## (1) ヤード

厚板工程にはスラブヤード、製品倉庫等の置場があり、搬送にはクレーンが使用される。従来は現品の管理からクレーン操作まで、すべてを人手に依存しており、要員合理化、作業環境上の問題点であった。最近では、地番管理方式等により、鋼板位置を3次的に把握し、搬送命令を誘導無線経由でクレーン運転者や自動クレーンに与える方式を採用し、無人に近いヤード操業が実業している。

## (2) 加熱

従来のアナログ方式の工業計器による加熱炉 ACC (Automatic Combustion Control) はデジタル化され、空燃比制御におけるクロスリミット制御、オートチューニング等、制御アルゴリズムの高度化が可能となった。また、省エネルギーを志向した炉内雰囲気ガスの  $O_2$  制御、さらには数式モデルを用いて推定した炉内鋼材温度とミルペーシング機能等から決まる加熱負荷より、加熱炉各帯の炉温設定を行う加熱炉計算機制御が実用化された。

最近では、連铸と圧延を同期化・連続化し、ホットチャージが行われる傾向にあるが、この場合、加熱炉は両工程間のバッファ機能を果たす必要があり、かつ熱片・冷片の同時加熱も生じるので、大きな負荷変動にも適応できる制御モデルの開発が進められている。また、制御性の向上には炉内鋼材測温技術を必要とし、背光雑音の影響を除去する方法についての地道な開発が続けられている。

ホットチャージ率の拡大には、加熱炉装入前での素材表面欠陥除去技術も欠かせず、横び割れ、コーナ割れを対象とした渦流法による探傷と探傷結果に基づく自動手入れを結合した設備も実用化されている。

## (3) 圧延

圧延は厚板製造の要であり、昭和 40 年代より品質、歩留り、能率の向上を目的としたミル計算機制御、自動板厚制御 (AGC) の開発が進められ操業に定着してきたが、昭和 50 年代においては制御モデルの高度化により、大きい前進がみられた。

## (a) 板厚制御

従来、板厚を均一に制御する BISRA 方式の AGC が主流であったが、ゲージメータ式によつて絶対板厚を演算し制御する絶対値 AGC、前パスデータより次パスのスキッドマークの影響等を予測し圧下を制御するフィードフォワード AGC、過補償板厚制御、信号処理によるロール偏心除去等が実用化された。また、設備的には厚板圧延機にも応答性の優れた油圧圧下が一般化される傾向にあり、さらに変形抵抗予測式の精度向上によるミ

ルセットアップ機能の高度化、後述する厚さ計の高精度化ともあいまって、板厚精度が大きく向上した。

## (b) 板幅、板長さ制御

厚板圧延においては、板幅、板長さ制御も基本的には転回時を含む板厚の制御によつて行われるが、いつその精度向上を狙つて、板幅、板長さ計の実測値を制御にフィードバックする方法も実用化されている。これら制御の基礎となるセンサーについても、光学式距離計を利用した幅計の高精度化、従来の HMD に代え水柱式鋼板検出器を用いることによる、パルスカウント方式のアズロール長さ計の高精度化、高信頼化が進んだ。

## (c) 平坦度制御

平坦度制御については、圧延中の各パスにおけるクラウン比率の挙動に着目した制御が、昭和 40 年代に開発された。当初は圧延荷重による板クラウンのみを考慮するものであったが、ロールの熱膨張や摩耗等の影響を取り入れることにより適応性の向上がはかられた。さらに、VC ロールをアクチュエータとする積極的な制御方式も開発された。また、平坦度についても最終的にはセンサーによる閉ループ制御が必要であり、光切断法を応用した平坦度計の開発、実用化が進んだ。

## (d) 板クラウン制御

平坦度制御は板クラウンに着目した制御であるが、ここで開発された板クラウン予測モデルにもとづき、目標とする板クラウンを得るパススケジュール決定方法が実用化されている。センサーとしては  $\gamma$  線厚さ計がデジタル化や自動較正機能の追加によつて高精度化され、板の中央部と両端部を同時測定し、板クラウンを検出する方法が実用化されている。さらに、板クラウン測定結果を次材のパススケジュールに反映させる板間での板クラウン制御、前述の VC ロールによる板クラウン制御が開発されている。

## (e) 平面形状制御

昭和 50 年代に入つて大きく前進した機能に、平面形状制御をあげることができる。圧延中における、平面形状の変化を定量的に予測し、これを補償するよう転回直前のパスにおいて、圧下制御によりあらかじめ素材の断面形状を変化させておくものである。その原理はすでに図 4・3・17 に示してある。このほかにもエッジ圧延法、差圧幅出し圧延法等いくつかの平面形状制御技術が開発され、歩留りの向上に大きく貢献した。

## (f) 材質制御

材質制御の面では、従来から低温靱性の向上を目的とした制御圧延が行われてきたが、最近、強度の制御、省プロセスを目的としたオンライン冷却設備が相次いで稼働した。ここにおいても材質制御モデルに基づく冷却速

度および冷却停止温度の決定と制御がコンピュータによつて自動化されている。

#### (g) 全自動圧延

厚板圧延において、可逆圧延シーケンスは手動にゆだねられてきた。圧延中の加減速シーケンスや噛み出し時の鋼板キックアウト距離の最適化、圧延開始タイミング決定への予測動作の取り込み等によつて、ようやく圧延能率面でオペレータの技量を凌駕することが可能になり、テーブル制御を含む全自動圧延が操業に定着するに至つた。

#### (4) 精整

精整ラインには剪断、マーキング、検査、手入れ、熱処理、ショット等多くの工程がある。従来の手動操業を主体とする精整ラインでは、労働生産性、労働環境、品質保証体制の諸点で問題が多く、精整ラインにおける各工程および工程間の搬送に関する自動化技術の開発努力が続けられてきた。その結果、目視による検査等一部の機能を除き自動化技術が開発され、従来の労働集約的イメージを一掃した精整ラインが実現している。以下に各工程の自動化技術の進歩について記す。

#### (a) 剪断

サイドシャー、エンドシャー等の剪断工程では、以前から上位コンピュータとリンクした、プリセットレベルの自動剪断が実用化された。これに加えて、鋼板の先後端クロップ形状やキャンパ量を含む、鋼板平面形状認識装置が開発され、さらに測定結果に基づき、鋼板の中切り位置を含む最適剪断位置を決定するシステムも実用化されている。

#### (b) マーキング

厚板工程には表示、刻印、ラベル貼り付けといった作業が存在するが、昭和40年代よりこれら作業の自動化技術の開発が進められてきた。表示、刻印についてはいつたん鋼板をテーブル上に停止して行うものであつたが、最近では走間での高能率マーキング技術が開発されている。すなわち、鋼板の搬送と同期を取りつつステンシルを供給し吹付表示する方式、輪転印刷方式の表示機が実用化されている。また、刻印についても、自動選字機能を持った刻印リングにより、鋼板上に転動刻印する方式が開発されている。

鋼板を積み重ねた状態で識別可能なよう、側面にラベルを貼付するが、ラベル作成から貼付までを自動化した装置も開発されている。

#### (c) 検査

内部欠陥の品質保証のために、超音波探傷装置が導入されてきたが、信号処理のデジタル化によりS-N比の向上が得られ、また感度等の探傷条件の自動設定や自

己診断が可能となつた。さらに大量の探傷データのコンピュータ処理による合否判定も自動化されて、全自動探傷が実現した。

#### (d) 手入れ

厚板表面疵の手入れはハンドグラインダやワゴングラインダによる手作業で行われてきたが、疵位置を記憶させることによつて、部分手入れも可能な自動鋼板手入れ装置が開発されている。

#### (e) 熱処理

焼ならし、焼入れ、焼もどし等を目的とした、各種の熱処理炉があるが、コンピュータの導入により鋼板位置をトラッキングし、伝熱モデルによつて鋼板温度を予測し制御している例もある。

#### (f) 搬送

精整ラインのテーブル長は1km以上に及ぶが、従来鋼板搬送は目視により手動で行われてきた。各テーブルに接続されたパルスゼネレータと要所要所に配置された鋼板検出器からの信号により、鋼板位置を精度よくトラッキングし、鋼板を自動搬送する技術が開発された。先に述べた各種自動化技術と結合することによつて、全自動運転に近い精整ラインが実現している。

### 4.7.6 条鋼圧延

条鋼分野における計測・制御技術の変遷を、例えば鉄鋼協会共同研究会計測部会への報告テーマについて、ここ10年間の分類別件数の推移により表すと図4.7.14のようになる。この図における特徴的なこととして、

①半成品・成品の温度、寸法・形状、疵の測定といった品質に関するテーマが、総件数の約8割を占めること。

②前半においては、寸法・形状の測定に関するテーマの比率が高いこと。

③後半においては、自動探傷に関するテーマが増加傾向にあること。

④温度測定に関しては、散発的な報告に留まつていること。

⑤制御関係のテーマは、ほぼ平均的に報告されていること。

が挙げられ、ほぼこの10年間の技術発展の傾向を表しており、また、品質に対する厳しい要求の断面がうかがわれる。

#### (1) 寸法・形状の測定

形鋼の寸法・形状の測定は、その品種が多くまた複雑な形状をしているため、厚み、幅、曲がりの測定等部分的なものに留まつており、測定方法は板のそれらと類似している。断面プロファイルの測定等高度な技術を要する

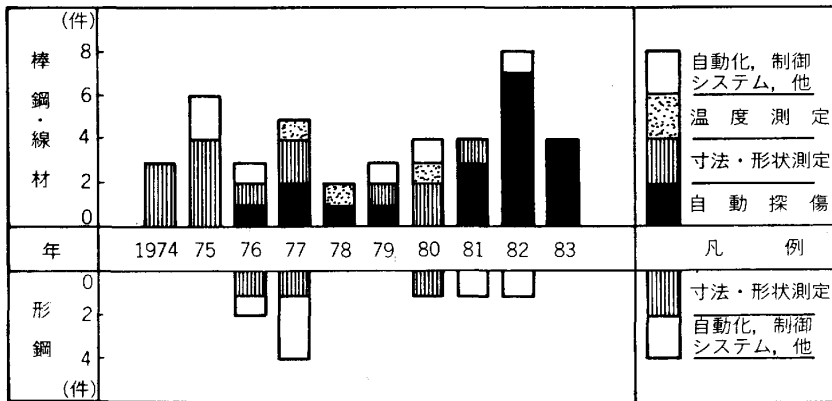


図 4.7.14 鉄鋼協会共同研究会計測部会における報告テーマの推移

表 4.7.7 線材・棒鋼の光電式寸法・形状測定方式

方 式		特 徴
① 単一素子受光形寸法計	①-1 回転スリット式	① 被測定物の高速振動による誤差を生じやすい。
	①-2 レーザ走査式	② レーザ式では、ダブルミラー方式によりその影響を小さくできる。
② 多素子受光形寸法計	②-1 ダイオードアレイ使用	① 高速走行材に対しては、原理的に CCD方式が優れる。
	②-2 CCD使用	
③ 断面プロフィール計	③-1 揺動走査式	② 最大径、最小径、偏径差等のほか断面形状そのものが測定できる。
	③-2 連続回転走査式	

表 4.7.8 鋼片・線材・棒鋼における自動探傷の各種方式

方 式	対 象 部 位		適 用 状 況
	表 層 部	内 部	
① 超音波探傷	○ { 斜 角 表面波	○ { 垂 直 斜 角	① 内部探傷は鋼片・棒鋼に広く普及 ② 表層・皮下探傷は、部分的に実用化、適用範囲拡大中
② 漏洩磁束探傷	○ { 回転プローブ 材回転	—	① 棒鋼の冷間探傷に広く普及
③ 渦流探傷	○ { 貫 通 回転プローブ	—	① 線材・棒鋼の冷間探傷に実用化 ② 熱間探傷で一部に適用、性能向上について開発・改良中
④ 蛍光磁粉探傷	○	—	① 鋼片の探傷に一部で実用化

自動測定は、今後の課題となつている。

一方、線・棒においては、比較的簡単な断面形状であるため、1970年以前より光電式熱間太さ計の実用化が試みられてきたが、その後表4.7.7に示す各種の方式が実用化され、80年前後にはほぼ現在の原形が完成された。その発展は、ダイオードアレイ・Charge Coupled Device (CCD) カメラ等素子の発達による高速測定と、電子技術・マイクロコンピュータの発達による高速かつ高度な信号処理・データ処理の実現に加え、安定測定のための機構の考案・改良等の総合的な技術開発の成果として結実し、最大径・最小径・偏径差等の評価因子のみ

に留まらず、成品断面プロフィールの測定も実用化され、普及の段階に至っている。さらに、高速性・耐環境性および精度の向上を目指した改良が続けられている。

(2) 自動探傷

線棒における自動探傷の開発は、1970年代前半より手掛けられ、表4.7.8に示す各種の方式の成品・半成品各工程への適用が研究されてきた。線棒の冷間探傷については漏洩磁束探傷法と超音波探傷法を主体として、70年代後半には実用化の域に達し、以後改良普及の段階に入っているが、圧延ライン中の熱間探傷は、高温材料の高速走行中探傷という条件において渦流探傷法を対象に

開発が続けられ、80年代に入りオンライン適用が始まりつつある。その方式には、材料貫通形と回転プローブ形とがあり、前者は構造が比較的簡単であるため適用例が多いが、原理上長手方向の連続疵に対する検出能力が劣るので、後者の方式の開発が進められてきた。後者は、プローブの冷却、プローブと材料の間隙調整機構、信号処理等について改良がはかられ、一部でオンライン適用・実用化されつつあるが、さらに性能および安定性向上に対する努力が重ねられている。

今後の自動探傷の方向は、成品品質の全長保証を効果的に行うために、連鑄または分塊以降の各プロセスにおいてオンライン自動探傷による工程制御を行い、無欠陥成品を製造することが目標となつている。

線棒以外では、軌条の自動探傷のほか特筆すべき発展が顕著でない。

### (3) 温度その他の計測

温度の計測は、加熱炉の焼上制御、制御圧延・制御冷却、巻取り、切断等の各過程における温度管理のため重要な位置づけにあり、二色温度計の普及、炉内鋼片温度測定法の改良、走査形温度計の応用のほか、トレーサビリティ体系の確立が計られてきたが、この10年間画期的な進展は見られず、改良的發展に留まつている。

その他、圧延機の制御あるいは測長の手段としてのドップラレーダ式速度計、レーザ式炉内鋼片検出器、マーク識別装置、トラッキング用材料センサー等の開発・改善・適用がはかられてきている。

### (4) 自動化・最適化

#### (a) 加熱炉の制御

鋼片の最適焼上制御は、炉内鋼片の温度予測モデルの開発を中心として進められてきたが、プロセスコンピュータの高速化・大容量化に伴い、シミュレーション形のモデルが実用化されてきており、条鋼圧延の鋼片形状条件に対し、二次元モデルの適用も行われている。

燃焼制御では、排ガス損失の低減を目的として、排ガス中酸素を評価因子とする空燃比制御が一般化し、さらに、排ガス中未燃分に着目した制御も実用化されてきている。

#### (b) 圧延ラインの制御

圧延成品の形状品質に重要な影響を与えるスタンド間張力の制御は、旧来ループ制御のほかはオペレータの運転技量に負う面が強かつたが、70年代前半より大形ユニバーサルミルにおいて、オンラインパススケジュールおよび圧下設定制御の実用化につづいて自動張力制御の適用が行われ、その後線棒の太径成品あるいは粗・中間圧延への適用が試みられてきた。その制御方式には、圧延機モータ電流、圧延機荷重等から間接的に張力を求め

る方式と、圧延ロールへの水平力を直接測定する方式とがあるが、孔形圧延は理論にのつとりにくい部分が多く、すべてのケースに適合するモデルの完成には至っていないもようであり、寸法・形状測定によるフィードバック・フィードフォワード制御あるいは学習制御等の適用と併せ、発展途上にある技術といえる。

一方、成品の物理的性状を決める重要因子である材料温度については、抽出時、圧延中、巻取り前・後等の各過程における温度管理による鋼種統合・拡大、熱処理省略等を目的としたいわゆる制御圧延・制御冷却が行われるようになってきているが、プロセスコンピュータにおけるシミュレーションモデルあるいは学習モデルと、直接デジタル制御装置を用いたフィードバック・フィードフォワード制御との組み合わせによる最適制御が、それら制御装置の機能向上に伴って実現されるに至つてきた。

また、形鋼・棒鋼の成品長さを材料条件と注文条件とに適合させて、歩留りを向上させるための最適切断制御も、プロセスコンピュータの機能として行われるようになってきている。

#### (c) 精整工程における自動化

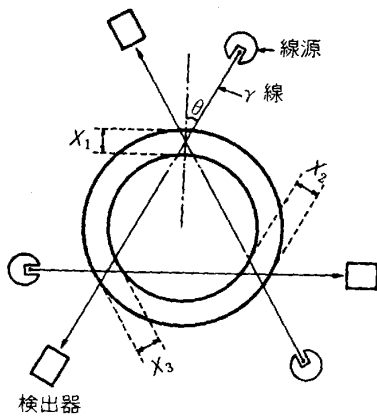
形鋼・棒鋼は成品数が多く、その仕分け・結束・加工・検査・倉庫・出荷等において、ハンドリング作業が複雑で人手に頼る作業が多く、合理化が遅れていた分野であつたが、プロセスコンピュータの機能向上と成品の分離装置の改良等により鋼片段階から切断成品までの自動トラッキングが可能となり、さらに、マーカ・ラベラ・結束機・玉掛装置・検査装置等自動化機器の実用化ともあいまって全ラインの自動化がはかれるようになり、全成品の経歴管理、品質保証、省力等に大きな効果が得られるようになってきている。

## 4.7.7 鋼管

### (1) 計測

#### (a) 寸法計測

継目無鋼管の外径、肉厚測定は品質保証項目として重要であり、小、中径管を対象としたパルス反射方式超音波測寸装置による全長測定が100 m/minの高速で行われるようになった。測定精度は外径 $\pm 150 \mu\text{m}$ 、肉厚 $\pm 50 \mu\text{m}$ が得られ、この方式を用いた管端クロップ適正切断位置の決定法が実用されている。熱間状態においても100  $\mu\text{m}$ の精度で外径を測定できる光学方式がオンラインで実用されている。継目無鋼管の製造では圧延長さのばらつき減少、肉厚の均一性等が歩留向上、品質向上の点で重要である。この目的にストレッチレデュース側で $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内の精度で測定可能なリニアア



$$I_1 = I_{10} \exp\{-\mu K(X_1 + X_2)\}$$

$$I_2 = I_{20} \exp\{-\mu K(X_2 + X_3)\}$$

$$I_3 = I_{30} \exp\{-\mu K(X_3 + X_1)\}$$

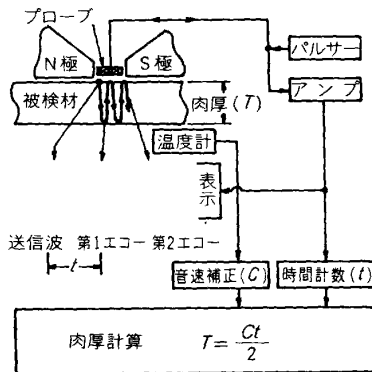
$$X_1 = \frac{1}{\mu K} \cdot \frac{1}{2} \ln \left( \frac{I_{10}}{I_1} \cdot \frac{I_2}{I_{20}} \cdot \frac{I_{30}}{I_3} \right)$$

$$X_2 = \frac{1}{\mu K} \cdot \frac{1}{2} \ln \left( \frac{I_{20}}{I_2} \cdot \frac{I_3}{I_{30}} \cdot \frac{I_{10}}{I_1} \right)$$

$$X_3 = \frac{1}{\mu K} \cdot \frac{1}{2} \ln \left( \frac{I_{30}}{I_3} \cdot \frac{I_1}{I_{10}} \cdot \frac{I_{20}}{I_2} \right)$$

$I$ :  $\gamma$  線強度

(a)  $\gamma$  線透過法 (3ビーム方式) の原理



$T$ : 鋼管肉厚 (mm)  
 $C$ : 超音波音速 (mm/ $\mu$ s)  
 $t$ : 送信波から第1エコーまでの時間

(b) 電磁超音波法

図 4-7-15 熱間肉厚測定法の原理

((a) 図: 船生ら: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 1139  
 (b) 図: 山口ら: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 1131)

レイを用いた非接触圧延長さ計や、偏肉率低減を可能とする圧延制御のための熱間肉厚測定法が開発された。図 4-7-15(a)は  $\gamma$  線透過法によるマルチビーム方式を、図 4-7-15(b)は電磁超音波方式の熱間オンライン肉厚計の原理を示した。 $\gamma$  線 3 ビーム方式による計測値を用い、ミル設定値を最適化し、偏肉率が減少したと報告されている。

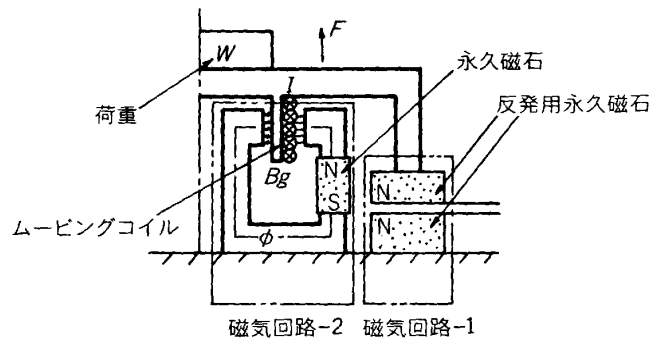
SAW 鋼管の長さ、外径、肉厚、周長等の自動測定装置も開発され、実用されている。

(b) 品質計測

最近 10 年間の非破壊検査の発展は目覚ましく、品質計測としての NDI 技術はこの 10 年間に完成したと言える。

表 4-7-9 代表的な探触子回転型超音波探傷機の仕様

	小径用	中径用
対象管外径	19.0 ~ 76.2 mm	165.2 ~ 660.4 mm
肉厚	1.6 ~ 8.7 mm	4.0 ~ 50.0 mm
曲がり	1/1000 以下	2/1000 以下
ヘッド回転数	3000 rpm	100 ~ 300 rpm
信号伝達	電磁カプリング	電磁カプリング
チャンネル数	14 ch	12 ch
探傷周波数	5 MHz	5 MHz
繰り返し周波数	最大 15 KHz	最大 10 KHz
検出能	0.2mm 深さの外面 ノッチを 120m/min の検査速度で検出可。	5% ノッチ及び 3.2mm 径のドリル穴を 38 m/ min の速度で検出可。



$F$ : 電磁力,  $I$ : ムービングコイルに流れる電流  
 $B_g$ : 空隙の磁束密度,  $\phi$ : 磁束

図 4-7-16 磁気浮上法の原理図

(日本鉄鋼協会共同研究会: 第 84 回計測部会 (1982 年 7 月) 住友金属工業(株) (私信))

鋼管の品質保証手段として広く用いられている超音波探傷の分野では探触子回転型探傷装置の適用拡大が著しい。特に継目無鋼管の成品検査には不可欠であり外径 16 インチまでの全寸法に適用されている。表 4-7-9 に一般的な仕様を示した。回転ヘッドには L, C 方向探傷用のほか肉厚測定用の探触子が組み込まれており多チャンネル化が進んでいる。またマイクロコンピュータの採用による感度校正, 条件設定, 信号処理等の自動化機能付装置が一般化した。この方式は ERW 鋼管へも適用されている。

次に注目すべきは油井用継目無鋼管の検査に用いられている漏洩磁束探傷装置の急速な進歩である。直流磁化方式の米国, ドイツ製のものや交流磁化方式の国産機など 20 台以上が稼働しており、導入率では世界一である。さらに学協会各小委員会の活動にもとづく研究, 調査の面でも我が国は高い水準にある。油井用鋼管内面探傷機, 非接触追従式センサーヘッド等我が国独自の技術開発も多く報告されている。図 4-7-16 は磁気浮上式非接触センサー追従機構を示す。この方式では安定した追従性能, 保護シュー, センサー等消耗部品の寿命延長によるコスト低減等の効果が得られている。

渦流探傷試験の分野では感度設定や信号の解析、処理に自動化が進んだ。

画像処理技術のこの分野への適用も特筆すべきでX線透過試験によつているスパイラル鋼管、UO鋼管の溶接部検査をX線テレビ装置により得た透過像の自動判定で行う装置が実用化されたほか、パイプ端部のネジ加工部の完全ネジ長さの自動測定技術の開発も行われた。

溶接部探傷試験の信頼性を高めるためのセンサーの溶接シームへの自動追従装置の開発、実用化も行われた。

(c) 製管プロセス計測

ERW管の最適入熱制御のための溶接電源周波数の微小変動計測、光切断法によるビード形状測定、シームアニーラ制御のための温度計測等ERW管製造プロセスに注目すべきものが多く適用されるようになった。

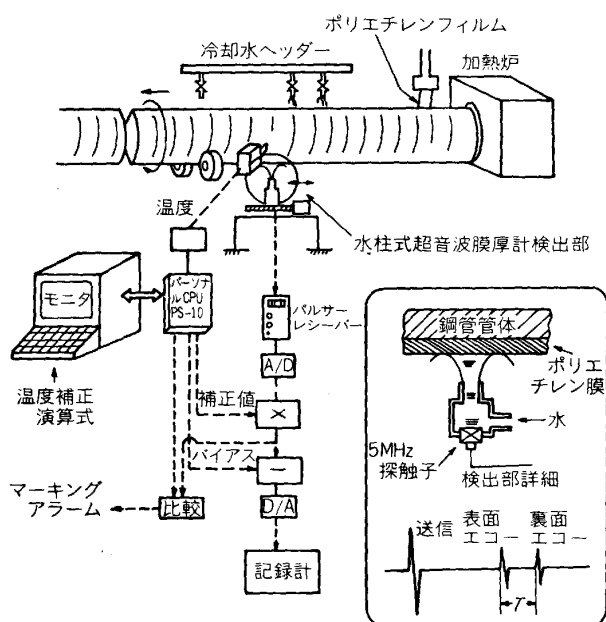


図 4.7.17 ポリエチレン被覆厚み計全体構成図  
(日本鉄鋼協会共同研究会：第 61 回計測部会 (1975 年 11 月) 日本鋼管(株) (私信))

防食性の優れたポリエチレン被覆鋼管の被覆厚みを水ジェットによる超音波パルスエコー方式で計測するシステムも実用になっている (図 4.7.17)。

以上述べたごとく、最近の 10 年間では品質計測が中心であつた。今後は画像処理技術等の先端技術を適用した計測技術の開発がいつそ進むことと考えられる。

(2) 制御

鋼管分野への計算機制御の適用は鋼板に比べ遅れていたが、昭和 50 年代に入つてから開発が活発に進められた。当初は工場内の単一設備に対する制御が主体であつたが、昭和 52 年頃から継目無鋼管工場の製管ライン全体を対象としたシステムが導入され始め、57 年以降に相次いで稼働した各社の新鋭工場では、精整ラインや自動倉庫を含めた大規模なプロセスコントロールシステムが構築されている。表 4.7.10 に過去 10 年間に開発、実用化された主な制御技術を示す。

(a) 継目無鋼管

昭和 49 年に住金海南に導入されたマンドレルミルラインのストレッチレデューサ制御が最初で、これは各スタンド間の張力を制御することにより鋼管の長さ为目标値にしようとするものであつた。その後、昭和 51~54 年にかけてオイルショックによる需要急増から中径継目無鋼管設備の新設、増強が次々に行われ、これに伴い寸法精度と歩留向上を主目的として、住金和歌山と川鉄知多でプラグミルラインに対する計算機制御システムが開発された。和歌山の方式は、サイザー出側での目標長さを定め、ピレット重量に応じてプラグミルとリーラーの圧下位置を制御するもので、プラグミルについては長手方向の肉厚均一化を図るべく、圧延中のダイナミックな圧下位置制御が行われている。これに対し知多の場合は、ピアサーやサイザーに対しても学習機能をもつたプリセット制御が行われ、全圧延機を対象とした寸法制御

表 4.7.10 鋼管分野において過去 10 年間に開発、実用化された主な制御技術

項目	目的、効果	実用化時期
継目無鋼管	圧下位置、回転数の適正化による製品寸法の高精度化 (ミル) (制御量) •ストレッチレデューサ：長さ •プラグミルライン：長さ、肉厚、外径 •マンドレルミル：肉厚、長さ	(昭和) 49 55 57
	ミルベータ制御	加熱炉抽出タイミングの最適化による生産性向上と省エネルギー 58
	溶接シームぬい制御	非破壊検査やシームアニーラ等の信頼性向上 49
溶接鋼管	鍛接管制御	鍛接温度の適正化と肉厚制御による品質安定と歩留向上 51
	電線管入熱制御	溶接入熱の適正化による品質の安定向上 56

となつている。

一方、マンドレルミルについても昭和 57 年に住金海南において、圧延中の速度変動に起因する管長手方向の肉厚変動を解消するための制御法が実用化された。これは、制御しない場合の肉厚変動を予測し、これをキャンセルするように各スタンド間の張力をダイナミックに制御するものである。さらに、昭和 58 年に相次いで稼働を開始した各社の傾斜穿孔圧延機方式の新ミルでは、ミル制御のみならず精整ラインや自動倉庫についても徹底した自動化が図られ、寸法精度と品質の高位安定並びに高生産性を実現している。

今後は、熱間肉厚計の各ミルへの適用が進み、偏肉抑制や管端部の寸法制御等により寸法のいつそうの高精度化が図られると共に、製管から精整までの一貫した情報による品質管理強化にも重点が置かれることになろう。

#### (b) 溶接鋼管

電縫管は、ボイラー用や油井管等の高級管分野への進出に伴い溶接品質を高位に安定させることが急務となり、昭和 51 年頃から溶接現象の解析や制御法の開発が本格化した。その結果、昭和 56~57 年にかけて新日鉄名古屋、君津と住金和歌山で入熱制御システムが実用化された。名古屋の方式は、高周波電源の微小な周期変動を計測し、これを所定の範囲内に制御するものであり、君津と和歌山は、溶接温度と肉厚、製管速度に応じて溶接入熱を制御しており、和歌山では溶接部の測温用に新しく開発された温度パターン計が用いられている。

鍛接管については、昭和 51 年に住金鹿島に世界初の計算機制御システムが導入されている。これは、帯鋼の両端と中央部を適温に維持するための鍛接温度制御と帯鋼の板厚変動を補償する肉厚制御等から成っている。

また、昭和 58 年に川鉄千葉の UOE 鋼管工場に導入されたシステムは、鋼管一本ごとの強力な現品管理に基づく高度の品質保証を実現しようとするもので、今後の一つの方向を示すものといえる。

## 4.8 分析ならびに試験法

### 4.8.1 鉄鋼分析法

第 1 次石油危機以降、最近 10 年間に鉄鋼業を取り巻く環境は大きく変化し、従来の量産体制からの脱皮を余儀なくされた。すなわち生産量の頭打ち状態が定常化するとともに省資源、省エネルギー、歩留向上によるコストダウンと製品の高級化・高付加価値化が指向された。

したがって新技術・新製品の開発もこの要請を反映したものとなり、高炉のオイルレス操業、炉頂発電、連続

鑄造の拡大、溶銑予備処理法、二次精錬法などの技術および高張力鋼板、耐 HIC 鋼、各種表面処理鋼板などの製品が開発され大きな成果を上げてきた。分析部門においても同様な変革が要請され環境や技術の変化を先取りした新技術の開発、新しい機器の開発・導入、自動化の推進などにより対応してきた。

この間の主要な分析技術としては

①オンライン分析法の主体である発光分光分析法は新測光法の開発によつて著しく精度が向上し、高速発光機の普及とあいまつて生産部門の歩留向上、品質改善に大きく寄与した。

②高周波誘導結合プラズマ発光分光分析装置の導入と実用化および蛍光 X 線分析-融解法の普及と適用拡大によつて化学分析の機器化が進み、分析の迅速化と省力化が達成された。

③グリムグロー放電分光分析法など各種の新鋭分析機器が実用化されて局所および状態分析に活用され、材料研究および製品開発に有用な知見を見出しその進展を促した。

④清浄鋼など製品の高級化に対応して微量分析法の開発が、また鋼中ガスおよび非金属介在物分析における状態分析法の研究が進められ、品質改善に貢献した。

⑤生産設備の連続化、高速化に応じた自動化機器および自動分析システムが開発され、操業管理のレベルアップおよび品質保証体制の確立に重要な役割を果たすと同時に分析の省力化にも寄与した。

などが上げられる。分析部門はこれらの技術を効果的に駆使するとともにこれまで蓄積した技術を応用して、常にトータルコストミニマムを指向しながら、多量の分析情報を正確かつタイムリーに提供してきた。以下にその詳細を述べる。

#### (1) 発光分光分析法

製銑・製鋼工程におけるオンライン分析法として広く用いられている発光分光分析法はスパークあるいはアーク放電を励起源とする方法で、400~800 Hz の高速発光装置を用いれば約 5~10 s で多元素の分析ができる。しかし放電時に  $Al_2O_3$  などの介在物に選択放電しやすく、異常に大きな発光強度を示す。このため光電子増倍管の出力電流を積分コンデンサーで一定時間積分する従来の測光法では、しばしば Al などに異常値が出現した。この問題を解決するために開発されたのが PDA 測光法 (Pulse Distribution Analysis Method) である。これはスパーク放電によつて生じたスペクトル線の強度を放電ごとに測定・記憶し、選択放電に起因する異常強度を除いた後、強度の出現度数分布を統計的に処理し分析値を得る方法 (図 4.8.1 参照) で異常値が解消され